

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

Электротехнологии и электротехника

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ В. Н. Тимофеев

« ____ » _____ 2017 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМОМ ЭЛЕКТРОНАГРЕВА В УСТАНОВКЕ
РАВНОКАНАЛЬНОГО ПРЕССОВАНИЯ**

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

13.04.02.07 Электротехнологии в металлургии

Научный руководитель _____ доцент, к.т.н.

Т. А. Боякова

Выпускник _____

А. В. Игнатов

Рецензент _____

С.Н. Перфильев

Нормоконтролёр _____ д.т.н

М. В. Первухин

Красноярск 2017

Реферат

Отчет содержит 71 страница, 33 рисунка, 5 таблиц, 71 источник.

УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМОМ ЭЛЕКТРОНАГРЕВА В УСТАНОВКАХ РАВНОКАНАЛЬНОГО ПРЕССОВАНИЯ.

Актуальность. Данная разработка позволяет получить новую продукцию алюминиевой проволоки, с уникальными характеристиками, а также дает возможность для дальнейшего производства более тонкой проволоки.

Объектом исследования являются индукционные установки сквозного нагрева цилиндрического прутка, а также электротехнологические устройства, предназначенные для получения особо тонкой алюминиевой проволоки, с улучшенными физико-техническими свойствами.

Целью работы является разработка технологической цепочки для получения откалиброванного алюминиевого для дальнейшего волочения, включающего электромагнитный кристаллизатор и установку индукционного нагрева.

Задачи проекта:

1. Обзор литературы по существующим способам прокатки и экструзии проволоки; индукционному нагреву алюминиевых слитков.
2. Расчет индукционной установки сквозного нагрева алюминиевого слитка под пластическую деформацию.
3. Анализ легирующих компонентов.
4. Разработка эскизного проекта модуля непрерывной экструзии проволоки; математическая модель установки индукционного нагрева с использованием пакета ANSYS.

Методы исследования численные методы решения краевых задач с использованием программного обеспечения (MathCAD, ANSYS и ELTA).

Научная новизна заключается в получении абсолютно нового способа получения алюминиевой проволоки с идеальными физико-механическими параметрами, диаметром до $\varnothing=0,1$ мм.

Внедрение. Данной разработки будет реализовано фирмой ООО «Альянс2008» (г. Красноярск) совместно с кафедрой «Электротехнологии и электротехника» Сибирского Федерального университета, Политехнического института.

Публикации. Данная работа имеет одну публикацию в сборнике 9-ой Международной мультидисциплинарной конференции "Актуальные проблемы науки XXI века".

СОДЕРЖАНИЕ

1 Научные предпосылки	7
1.1 Основы классификации процессов прессования металлов	8
1.2 Волочение проволоки – суть и технология выполнения операции	8
1.3 Общее описание и принципиальная схема.....	10
1.3.1 Модуль калибровочной клетки.....	13
1.4 Существующие волочильные станы	15
1.4.1 Алюминиевая волочильная машина : LHD450	15
1.4.2 Волочильный стан типа UDZSA 5000/6	16
1.4.3 Волочильный стан Eurodraw	17
2 Индукционный нагрев	18
2.1 Расчет индуктора сквозного нагрева.....	20
3 Влияние примесей на свойства алюминия	27
3.1 Основные применяющиеся лигатуры алюминиевых сплавов	27
3.2 Применение лигатуры алюминий–титан–бор	31
3.2.1 Технология применения	32
3.3 Применение лигатуры алюминий–цирконий.....	33
3.3.1 Технология применения	34
4 Проектирование и моделирование будущего прототипа.....	35
4.1 Определение параметров работы установки.....	35
4.1.1 Модуль непрерывной экструзии.....	41
4.1.2 Намоточное устройство	50
4.2 Моделирование в среде ANSYS	58
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	61
ПРИЛОЖЕНИЕ А	68
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	69
ПРИЛОЖЕНИЕ В	70

ВВЕДЕНИЕ

Кафедрой «Электротехнологии и электротехника» создан опытно–промышленный литейный комплекс с электромагнитным кристаллизатором производительностью до 20 тонн в год непрерывно–литой заготовки диаметром 8 мм. На установке получены слитки из сплава 01417м, обладающие высокими механическими и электрическими свойствами, сохраняющимися до температуры 250°С.

В настоящий момент стоит задача повышения качества выпускаемой продукции – стабилизации диаметра слитка, что позволит повысить технологичность переработки изделий в проволоку и начать массовое внедрение алюминиевых проводов в авиакосмическую технику. Для этого предлагается перед отправкой литых слитков на волочильный завод производить предварительный индукционный нагрев слитка под пластическую деформацию и их калибровку с последующей непрерывной экструзией, что позволит поставлять потребителю продукт более глубокой переработки – калиброванную проволоку диаметрам до 4мм. При этом данный способ позволит перевести мелкодисперсную эвтектику (1–3мкм) в литом слитке в нанодисперсное состояние (менее 100 нм), что по заверению специалистов металлургов даст возможность получить при дальнейшем волочении проволоку диаметром до 0,1мм.

Целью проекта является разработка полной производственной цепочки по изготовлению проволоки из специальных алюминиевых сплавов с уникальными физико–механическими свойствами для бортовой проводки летательных аппаратов. Кроме кабельного производства из калиброванного слитка планируется получать, заклепки для летательных аппаратов и подводных лодок. Идея проекта состоит в совмещении, в производственном процессе изготовления проволоки, двух передовых технологий: литья в электромагнитный кристаллизатор и непрерывной экструзии. Это позволит получить алюминиевую проволоку с ранее не достижимыми параметрами.

Нововведением, не имеющим мировых аналогов, является организация технологической цепочки производства алюминиевой проволоки на базе технологий литья в электромагнитный кристаллизатор и непрерывной экструзии. Исходная литая заготовка диаметром 8–11мм отливается в электромагнитный кристаллизатор. За счет особенности технологии заготовка имеет мелкодисперсную структуру, что обеспечивает уникальные физико–механические свойства. Далее производятся ее нагрев и переработка в калиброванную проволоку диаметром 8мм на калибровочной клетке. Откалиброванная проволока диаметром 8мм далее поступает в установку непрерывной экструзии. Из установки выходит проволока диаметром 5мм. При этом за счет процесса прессования мелкодисперсная эвтектика в исходной проволоке переходит в нанодисперсное состояние, что позволяет дополнить эффект электромагнитного литья и еще более улучшить физико–механические свойства проволоки. Полученная проволока далее отправляется на волочильные заводы для проведения среднего и грубого волочения до диаметров 0,5мм и менее. Полученная проволока далее поступает на кабельные заводы для производства проводов, кабелей и кабельных сборок летательных аппаратов.

Для реализации предложенной технологической схемы необходимо создать опытно–промышленную установку для нагрева, калибровки слитка и непрерывной экструзии проволоки.

1 Научные предпосылки

Процессы обработки цветных металлов и сплавов включают в основном такие металлургические переделы, как литье заготовки, пластическую деформацию и термообработку. Несмотря на высокий уровень механизации и автоматизации на каждом переделе и обеспечение высокого качества обработки, методам получения металлоизделий из слитков присущи дополнительная высокая металлоемкость прессового оборудования и мощных прокатных станов, необходимость наличия больших производственных площадей, обслуживающего персонала и т.д. [1–5].

Одной из основных тенденций развития металлургической отрасли является совмещение этих переделов в одну непрерывную технологическую линию, лишенную отмеченных недостатков. Эту проблему решали многие металлурги–обработчики, начиная с середины XIX века, прежде всего это относится к работам Г. Бессемера, Г. Александера, Д. Грина, Т. Авитцура, Д. Проперци. Специалистами таких организаций, как «Гипроцветметобработка», «ВНИИМетмаш», «ВИАМ» и др. разработаны и внедрены в промышленность агрегаты непрерывного литья и прокатки, бесслитковой прокатки ленты, что, несомненно, явилось значительным достижением отечественной металлургии. Но наряду с очевидной перспективностью применения процессов непрерывного литья и прокатки в настоящее время продолжают исследовательские работы, направленные на разработку более эффективных и гибких технологических линий по совмещению непрерывного литья и обработки металлов давлением. Одно из этих направлений – непрерывное литье и прессование цветных металлов, позволяющее повысить технико–экономические показатели изготовления мелкосортной продукции по сравнению с традиционным прессованием на горизонтальных гидравлических прессах. Работу над решением этой проблемы стимулирует создание и широкое распространение в последние годы технологических линий непрерывного прессования цветных металлов.

1.1 Основы классификации процессов прессования металлов

В настоящее время существует много разновидностей процесса прессования, классифицирование которых представляет известный интерес и проводится по наиболее общим типовым признакам: по кинематическим признакам, т.е. по связи направлений рабочего перемещения исполнительного инструмента внутри контейнера и истечения материала; по направлению истечения материала и размещению канала матрицы относительно продольной оси прессования; по граничным условиям процесса; по кинематическим условиям процесса; по конструкции прессового инструмента; по температурным условиям процесса; по виду продукции – готовые изделия или полуфабрикаты; по характеру прессуемого материала; по геометрическим условиям истечения; по типу используемого оборудования [6–10]. Большая часть указанных способов реализуется в прерывистом режиме истечения, т.е. с пресс–остатком, который отделяется от изделия в конце цикла. Однако, в последнее время появились способы полунепрерывного и непрерывного прессования прутков и труб [11–15].

1.2 Волочение проволоки – суть и технология выполнения операции

Под волочением понимают процесс, который состоит в том, что заготовку протягивают на специальном оборудовании через сужающееся отверстие. Исходная заготовка может быть медной, стальной, алюминиевой. Инструмент, в котором сделано отверстие, носит название волоки, а само отверстие, от конфигурации коего зависит форма изготавливаемого профиля, называют фильерой.

Методика волочения по сравнению с прокаткой обеспечивает в разы большую чистоту и точность поверхности проволоки, а также различных профилей, прутков, труб. Кроме того, протягиваемый металл

характеризуется изменением (в лучшую сторону) механических параметров, что обусловлено укреплением (снятие наклепа) готовых изделий. Волочение активно применяется при изготовлении фасонных очень точных профилей, разных по диаметру труб, проволоки сечением от 1–2 микрон до 10 (а иногда и больше) миллиметров.



Рисунок 1.1 – Волочительный стан алюминиевой проволоки

Стоит отметить и тот факт, что современная технология волочения гарантирует отличную производительность оборудования, используемого для производства проволоки. Волоки сейчас функционируют без каких-либо сбоев на огромных скоростях выполнения операции (до 60 метров в секунду) при больших величинах обжатия исходного материала (например, медной заготовки, стальной и так далее).

Процесс волочения включает в себя несколько этапов, которые приводятся далее:

- травление исходного сырья в сернокислом растворе, доведенном до температуры порядка 50 градусов (операция необходима для того, чтобы увеличить срок службы матрицы за счет снятия с заготовок окарины);
- отжиг металла (предварительный), выполняемый для увеличения пластичных характеристик металла и обеспечения его мелкозернистой структуры;

- нейтрализация агрессивного раствора для травления и промывка заготовок;
- использование молота либо ковочных валков для заострения концов исходного металлического сырья (алюминиевой, медной, стальной заготовки);
- непосредственно процесс волочения;
- выполнение отжига.

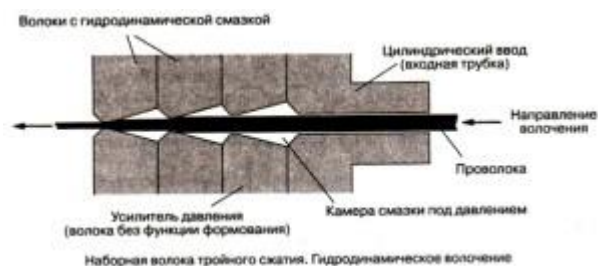


Рисунок 1.2 – Процесс гидродинамического волочения

Дополнительно готовая проволока подвергается различным обрабатывающим операциям (резка изделий на требуемые по длине отрезки, правка, снятие концов и пр.).

1.3 Общее описание и принципиальная схема

Опытно–промышленная установка для калибровки слитка и непрерывной экструзии проволоки должна быть выполнена по модульному принципу и состоять из общей силовой рамы с мотор–редуктором и сменных модулей: модуля калибровочной клетки (модуль ПРОКАТКА) и модуля непрерывной экструзии (модуль КОНФОРМ). Принципиальная схема установки приведена на рисунке 1.3.

В состав опытно–промышленной установки для калибровки слитка и непрерывной экструзии проволоки входит следующее оборудование:

- 1.перемешивающее устройство;

2. модуль электромагнитного кристаллизатора;
3. система охлаждения слитка;
4. датчик литого слитка;
5. индуктор предварительного нагрева;
6. модуль КОНФОРМ;
7. намотчик проволоки;
8. пульт управления и АСУ ТП;
9. частотный преобразователь ВЕСПЕР EI-9011-040H;
10. мотор-редуктор МР-3-500-35-8;
11. силовая рама установки.

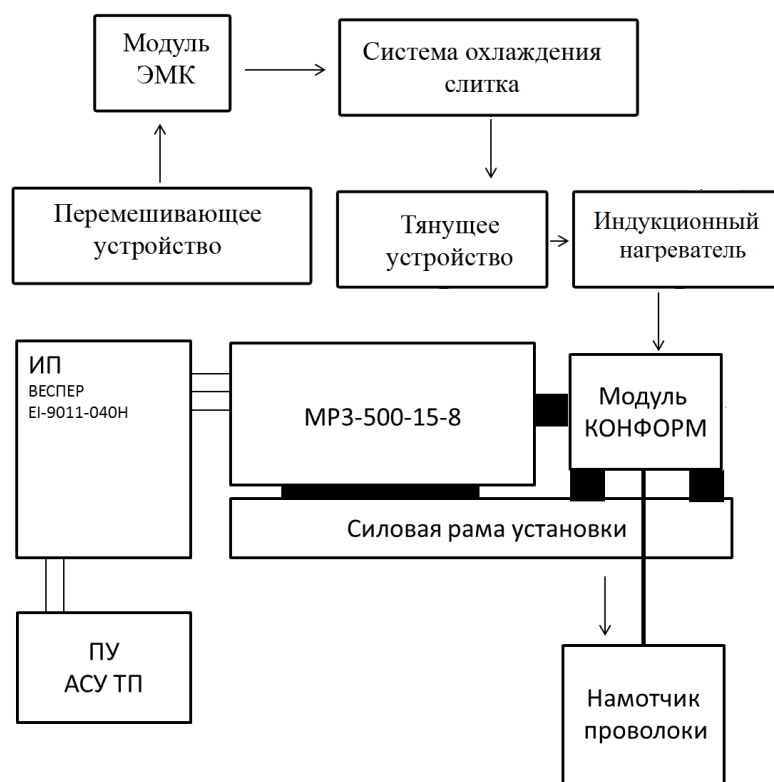


Рисунок 1.3 – Общий план комплекса кристаллизации и экструзии

Установка должна обладать следующими характеристиками:

- мощность электродвигателя 22кВт;
- номинальная частота вращения выходного вала редуктора 8 об/мин;
- диаметры на модуле калибровочной клетки от 4 до 11 мм;
- диаметр на входе в модуль непрерывного прессования от 8 до 11 мм;

- диаметр на выходе из модуля непрерывного прессования 5 мм;
- допустимый предел прочности обрабатываемого изделия не более 350 МПа;

- производительность установки не менее 30 кг/час.

Разрабатываемая технология производства проволоки из специальных алюминиевых сплавов для нужд авиакосмической промышленности должна обеспечивать:

- производство проволоки из сплавов 01417 и АМГ6;
- производительность технологии по литью в один ручей не менее 5 кг/час;

- выходной диаметром до 4мм с отклонением не более 0,1мм;

- размер дендритной ячейки в проволоке не более 5мкм;

- полное отсутствие оксидов в химическом составе получаемых заготовок;

- уменьшение брака на 20–30% за счет уменьшения количества обрывов проволоки при волочении тонких диаметров;

- сокращение технологических операций отжига и волочения на 30%.

Мотор–редуктор и частотный преобразователь являются стандартным промышленным оборудованием. Остальное оборудование является специальным и будет разработано силами сотрудников кафедры «Электротехнологии и электротехника». Изготовление данных узлов установки будет осуществлено на машиностроительных предприятиях города Красноярска.

1.3.1 Модуль калибровочной клетки

Согласно, технического задания необходимо получать калиброванную заготовку диаметром от 4мм до 11мм. Созданный опытно–промышленный литейный комплекс с электромагнитным кристаллизатором позволяет производить непрерывно–литую заготовку диаметром от 8мм до 12мм. В связи с этим была рассчитана таблица с коэффициентами деформации для данных диаметров.

Таблица 1.1 – Значение коэффициента деформации для разных маршрутов прокатки проволоки диаметром от 4 до 12мм

Диаметр проволоки	Коэффициент деформации	Соотношение диаметра проволоки с коэффициентом деформации																	
		D1	12,0	11,5	11,0	10,5	10,0	9,5	9,0	8,5	8,0	7,5	7,0	6,5	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0
D0	F0/F1	113,1	103,9	95,0	86,6	78,5	70,9	63,6	56,7	50,3	44,2	38,5	33,2	28,3	23,8	19,6	15,9	12,6	
12,0	113,1	0%	8%	16%	23%	31%	37%	44%	50%	56%	61%	66%	71%	75%	79%	83%	86%	89%	
11,5	103,9		0%	9%	17%	24%	32%	39%	45%	52%	57%	63%	68%	73%	77%	81%	85%	88%	
11,0	95,0			0%	9%	17%	25%	33%	40%	47%	54%	60%	65%	70%	75%	79%	83%	87%	
10,5	86,6				0%	9%	18%	27%	34%	42%	49%	56%	62%	67%	73%	77%	82%	85%	
10,0	78,5					0%	10%	19%	28%	36%	44%	51%	58%	64%	70%	75%	80%	84%	
9,5	70,9						0%	10%	20%	29%	38%	46%	53%	60%	66%	72%	78%	82%	
9,0	63,6							0%	11%	21%	31%	40%	48%	56%	63%	69%	75%	80%	
8,5	56,7								0%	11%	22%	32%	42%	50%	58%	65%	72%	78%	
8,0	50,3									0%	12%	23%	34%	44%	53%	61%	68%	75%	
7,5	44,2										0%	13%	25%	36%	46%	56%	64%	72%	
7,0	38,5											0%	14%	27%	38%	49%	59%	67%	
6,5	33,2												0%	15%	28%	41%	52%	62%	
6,0	28,3													0%	16%	31%	44%	56%	
5,5	23,8														0%	17%	33%	47%	
5,0	19,6															0%	19%	36%	
4,5	15,9																0%	21%	
4,0	12,6																	0%	

Для исходных деформируемых сплавов (01417 и свАМгб) рекомендуется максимально допустимый коэффициент вытяжки за один проход не более 20%. Такое значение позволит при прокатке исключить

возможность появления заусенцев на заготовки из-за ее уширения. Рекомендуется использовать следующие калибры при прокатке: 11,0; 10,0; 9,0; 8,5; 8,0; 7,5; 7,0; 6,5; 6,0; 5,5; 5,0; 4,5; 4,0.

Разрабатываемая опытно-промышленная установка проектируется по модульному принципу, поэтому для привода калибровочной клетки будет использоваться мотор-редуктор МР-3-500-35-8 с номинальной частотой вращения 8 об/мин [52].

Прокатная клетка для данной технологической задачи может быть выполнена по двух или трех валковой схемы. Использование двухвалковой системы требует производить прокатку по специальным схемам (овал-круг, квадрат-ромб-круг и т.д.), что ведет к существенному усложнению конструкции (необходимы обжимные и чистовые калибры, проводки заготовки и т.п.), а также данные схемы менее гибки в процессе работы и рассчитаны для работы на определенный конечный сортамент с высокой производительностью [53].

Трех валковая технология для проволочно-мелкосортного и заготовочного производства была внедрена в 1954 году, развиваясь в современную технологию RSB (редукционно-калибровочного блока), используемую сегодня. Впервые трёхвалковая технология для чистовой прокатки и калибровки сортового проката была выбрана в конце 70-х годов, так как подробные эксперименты совместно с одним из производителей выявили значительные различия по сравнению с традиционной прокаткой в клетях с двумя валками. По сравнению с двухвалковой, деформация тремя валками позволяет уменьшить уширение и повысить эффективность пластического деформирования, что позволяет уменьшить допуски; снизить контактные напряжения, достичь равномерности деформации по поперечному сечению [54].

Исходя из данных особенностей двух и трех валковых клеток, для опытной установки предлагается использовать трех валковые клетки механически связанные друг с другом.

1.4 Существующие волочильные станы

1.4.1 Алюминиевая волочильная машина : LHD450

Машина волочения проволоки из алюминия и алюминиевого сплава представлена в трёх моделях: LHD450/9; LHD450/11; LHD450/13.

Таблица 1.2– Технические характеристики стана

Тип	LHD450/9	LHD450/11	LHD450/13
Макс. волока	9	11	13
Диаметр входной проволоки(мм)	Φ9.5 (Φ12)	Φ9.5 (Φ12)	Φ9.5 (Φ12)
Диаметр выходной проволоки(мм)	Φ3.0–Φ5.0	Φ2.35–Φ5.0	Φ1.8–5.0
Макс. скорость линии(м/сек)	18	20	25
Диаметр волочильного барабана	450	450	450
Основной двигатель(кВт)	250	250	250
Общая мощность(кВт)	300	300	300

Страна изготовитель установки Китай.

Волочильные барабаны располагаются в горизонтальном ряду.

Поверхность волочильных барабанов покрыта материалом из карбидовольфрама, который очень прочный, и по твердости и износостойкий имеет длительный срок службы.

Главная волочильная машина и пассивный блок управляются отдельно, и все блоки могут быть удобно и легко заменены.

Автоматический, двойной приемник, обеспечивает непрерывную работу всей линии.

Управляемый двигатель постоянного тока, оснащён программируемым контроллером и сенсорным экраном (SiemensorPreface) что делает удобным для оператора установку и просмотр параметров на сенсорном экране.



Рисунок 1.4 – Блок с переключателями и потенциометрами

1.4.2 Волоочильный стан типа UDZSA 5000/6

Общий вид волоочильного стана UDZSA 5000/6 приведен на рисунке 1.5. Страна изготовитель Германия.

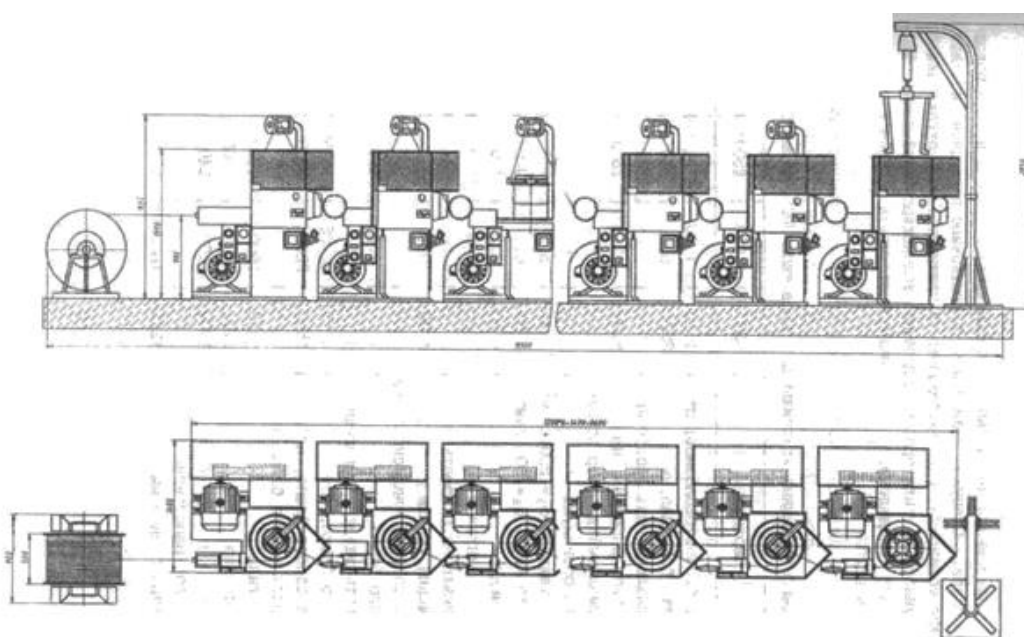


Рисунок 1.5 – Общий вид волоочильного стана UDZSA 5000/6

Шестикратный волоочильный стан блочного типа модели UDZSA 5000/6 с максимальным усилием волочения на первом черновом блоке равным 50 кН (5000 кг), предназначен для волочения стальной углеродистой проволоки

при диаметре заготовки до 12 мм. При волочении медной или алюминиевой проволоки диаметр заготовки может быть больше.

1.4.3 Волочильный стан Eurodraw

УстановкиEURODRAW/8 рассчитаны на маленький диаметр проволоки, данную установку возможно применить только после волочения через фильеры высокого диаметра. Ассортимент волочильного оборудованияEURODRAW ENERGY для производства проволоки из сплавов алюминия включает также машины для однопроволочного и многопроволочного волочения, рассчитанные на волочение до 16 проволок от максимального диаметра 2–1,8 мм до минимального диаметра 0,15 мм. Производство Италия.



Рисунок 1.6 – Общий вид волочильного стана UDZSA 5000/6

2 Индукционный нагрев

Существуют индукционные установки для ускоренного методического нагрева под пластическую деформацию, в которых активная мощность, в начале слитка гораздо выше, чем на последующих участках[68]. Такой эффект достигается за счет неравномерного распределением линейной токовой нагрузки по длине индуктора. Изменение мощности, выделяемой в заготовке в процессе нагрева, позволяет добиться градиента нагрева. Таким образом можно менять температуру в любом участке слитка.

Технология получения заготовки улучшенными физико–механические свойствами заключается в следующем: устанавливается загрузочное устройство для прутка на колесе–кристаллизаторе на расстоянии от входа деформируемого металла в башмак, соответствующем центральному углу не менее 180°. Из установки сквозного нагрева прутки выходят с температурой (300°C) так как тепловые потери могут достигать до 30°C. Включается установка конформ с угловой скоростью вращения 2 об/мин. Пруток из установки сквозного нагрева подается в канавку устройства конформ. Включается принудительное охлаждение колеса кристаллизатора и башмака. Производится подача прутка в канавку колеса–кристаллизатора. Готовая проволока наматывается при помощи намотчика. Непрерывно осуществляется контроль за входной (не более 440°C) и выходной температурой (не более 490°C) деформируемого металла с помощью пирометра. Управление входной и выходной температурами деформируемого металла проводится изменением интенсивности принудительного охлаждения. После остывания отпрессованного прутка требуемый размер получают с помощью прокатки. Пластическая деформация заготовок приводит к образованию нанодисперсной эвтектики, что обеспечивает изготовление проволоки из специальных алюминиевых сплавов диаметром до 100 мкм[66].

В качестве предпускового нагревателя для нагрева алюминиевого прутка перед процессом волочения используется установка индукционного сквозного нагрева. Предварительный нагрев позволяет сократить время работы на холостом ходу, следовательно, увеличить производительность за счет большего времени в работе, снизить термические напряжения на металлическом слитке и на устройстве волочения, тем самым уменьшая износ оборудования.

Помимо работы индукционной установки в предпусковом режиме, планирует использование её, в устоявшемся режиме, но со сниженной мощностью, это позволит подготовить структуру металлического слитка к последующей деформации, а также повысить производительность волочильного стана, так как металл после нагрева будет более пластичным, и как в следствии потребуются меньше энергии на преодоление сил трения при прохождении через башмак установки Конформ.

Нагрев проходящий в более плавном режиме позволит структуре прессованного изделия тщательно распределиться в момент деформации, что в свою очередь оказывает положительное влияние на физикомеханические свойства материала.

В связи с выше сказанным внедрение установки предварительного нагрева является экономически оправданным, по нескольким причинам, а именно: она позволит повысить качество выпускаемой продукции, увеличить производительность, увеличить ресурс оборудования.

Для создания такой установки произведен расчет по заданным параметрам индуктора и загрузки.

2.1 Расчет индуктора сквозного нагрева

Индукционный нагрев основан на поглощении электромагнитной энергии металлическими телами, помещенными в быстропеременное магнитное поле. По закону электромагнитной индукции в теле (заготовке, изделии) наводится ЭДС под действием которой в теле протекают так называемые вихревые токи, нагревающие тело. Проведем расчет индуктора для сквозного нагрева алюминиевого прутка.

1. Исходные данные.

Диаметр загрузки: $d_2 = 0,012$ м;

Высота загрузки в индукторе: $h_2 = 0,09$ м;

Материал загрузки: алюминий;

Напряжение на индукторе: $U = 380$ В;

Начальная температура нагрева $T_n = 20$ °С;

Конечная температура нагрева: $T_k = 300$ °С;

Теплоемкость алюминия $c_{ал} = 903$ (Дж/кг)·К;

Скорость движения загрузки $v_{заг} = 38,7$ мм/с;

Плотность алюминия $\rho_{ал} = 2400$ кг/м³;

Плотность меди $\rho_{м} = 8900$ кг/м³;

Удельное сопротивление меди $\rho_1 = 0,018$ (Ом·мм²)/м;

Удельное сопротивление алюминия $\rho_1 = 0,028$ (Ом·мм²)/м;

Магнитная проницаемость меди, $\mu_{1г} = 1$;

Магнитная проницаемость алюминия, $\mu_{2г} = 1$;

Масса загрузки в индукторе $\Delta m = 0,011$ кг/с;

Мощность необходимая для нагрева заготовки $\Delta P = 4553$ Вт;

Все расчетные значения приведены в приложении А.

2. Выбор основных размеров индуктора.

2.1 Максимальное значение полного КПД индуктора достигается при соотношении диаметров:

$$d_1 = d_2 + 2 \cdot b_s, \quad (2.1)$$

где b_s – воздушный зазор.

2.2. Площадь загрузки

$$S_{заг} = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4}. \quad (2.2)$$

2.3. Длину индуктора определяют из условия необходимости равномерного нагревания заготовки по всей длине заготовки, эта величина соответствует высоте загрузки $h_1 = h_2$.

Конструкция индуктора для сквозного нагрева представлена в приложении Б.

3. Выбор частоты питающего тока.

Принимаем значение оптимальной частоты $f=15000$ Гц исходя из существующих высокочастотных генераторов ООО «Фреал и Ко» [70–71].

4. Электрический расчет индуктора.

Электрическая схема замещения по полному току представлена на рисунке 2.1.

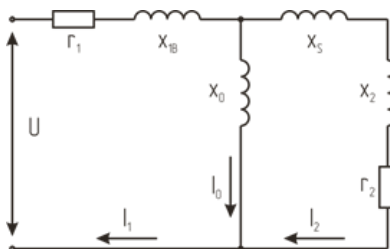


Рисунок 2.1 — Электрическая схема замещения по полному току

Упрощенная электрическая схема замещения представлена на рисунке 2.2.

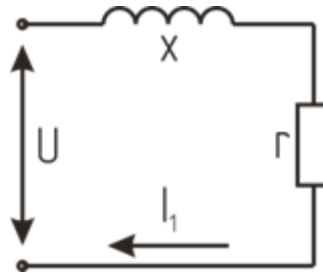


Рисунок 2.2— Упрощенная электрическая схема замещения

4.1. Глубина проникновения тока в материал индуктора:

$$\Delta_1 = 503 \cdot \sqrt{\frac{p_1}{f \cdot \mu_{1r}}}. \quad (2.3)$$

4.2. Глубина проникновения тока в материал загрузки:

$$\Delta_2 = 503 \cdot \sqrt{\frac{p_2}{f \cdot \mu_{1r}}}. \quad (2.4)$$

4.3. Активное сопротивление индуктора

$$r_1 = x_{1\sigma} = \frac{\pi \cdot p_1}{\Delta_1 \cdot h_1} \cdot \frac{1}{k_3}, \quad (2.5)$$

где k_3 — Коэффициент заполнения индуктора, равный отношению высоты витка без изоляции к шагу намотки (принимают от 0,75 до 0,9).

4.4. Относительный радиус загрузки:

$$R_2^- = \frac{D_2}{\sqrt{2} \cdot \Delta_2}. \quad (2.6)$$

4.5. Активное сопротивление загрузки:

$$r_2 = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot \frac{p_2 \cdot D_2^2}{\Delta_2^2 \cdot h_2} \cdot \Psi_a, \quad (2.7)$$

где Ψ_a — вспомогательная функция, определяемая по рисунку 23[67].

4.6. Реактивное сопротивление загрузки:

$$x_2 = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot \frac{p_2 \cdot D_2^2}{\Delta_2^2 \cdot h_2} \cdot \Psi_p, \quad (2.8)$$

где Ψ_p — вспомогательная функция, определяемая по рисунку 23[67];

4.7 Реактивное сопротивление воздушного зазора:

$$x_3 = \omega \cdot \mu_0 \cdot \frac{S_3}{h_2}. \quad (2.9)$$

4.8. Реактивное сопротивление обратного замыкания:

$$x_0 = x_{10} \cdot \frac{h_1}{h_1 - k_1 \cdot h_2}, \quad (2.10)$$

где $k_1 = 0,85$ — поправочный коэффициент, учитывающий конечную высоту индуктора и наличие магнитопровода, который определяется покрывым на рисунке 41[67].

$$x_{10} = 2 \cdot \pi^3 \cdot \frac{S_1 \cdot f}{h_1} \cdot 10^{-7} = 7,938 \cdot 10^{-5}. \quad (2.11)$$

4.9. Коэффициент приведения параметров загрузки к току индуктора:

$$C_{np} = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{x_0}\right)^2 + \left(1 + \frac{x_2 + x_3}{x_0}\right)^2}. \quad (2.12)$$

4.10. Приведенное активное сопротивление загрузки:

$$r'_2 = C_{np} \cdot r_2. \quad (2.13)$$

4.11. Приведенное реактивное сопротивление индуктора:

$$r'_2 = C_{np} \cdot \left((x_2 + x_3) \cdot \frac{(x_2 + x_3)^2 + r_2^2}{x_0} \right). \quad (2.14)$$

4.12. Эквивалентное активное сопротивление индуктора с нагрузкой:

$$r = r_1 + r'_2. \quad (2.15)$$

4.13. Эквивалентное реактивное сопротивление индуктора с нагрузкой:

$$x = x_{1B} + x'_2. \quad (2.16)$$

4.14. Эквивалентное полное сопротивление индуктора с нагрузкой:

$$z = \sqrt{r^2 + x^2} . \quad (2.17)$$

4.15.Электрический КПД индуктора:

$$\eta_u = \frac{r_2}{r} . \quad (2.18)$$

4.16. Коэффициент мощности индуктора:

$$\cos \varphi_u = \frac{r}{z} . \quad (2.19)$$

4.19.Мощность, приведенная к индуктору:

$$Pi = \frac{\Delta P}{\eta_u} . \quad (2.20)$$

4.20.Число витков индуктора:

$$\omega = U \cdot \sqrt{\frac{\cos \varphi}{Pi \cdot z}} . \quad (2.21)$$

4.21. Активное, реактивное и полное сопротивления индуктора с нагрузкой:

$$r_u = r + \omega^2 , \quad (2.22)$$

$$x_u = x + \omega^2 , \quad (2.23)$$

$$z_u = z + \omega^2 . \quad (2.24)$$

4.22. Ток индуктора:

$$I = \frac{U}{z_u}. \quad (2.25)$$

4.23. Настил тока в индукторе:

$$H_u = \frac{I \cdot \omega}{h_1}. \quad (2.26)$$

В соответствии с мощностью P_i и выбирают ближайший по мощности выпускаемый промышленностью источник питания (согласующий трансформатор или преобразователь частоты).

3 Влияние примесей на свойства алюминия

3.1 Основные применяющиеся лигатуры алюминиевых сплавов

Примеси различных элементов оказывают на коррозионную стойкость, физико– механические и технологические свойства алюминия. Почти вся лигатура снижает электропроводность.



Рисунок 3.1 – Влияние примесей на электропроводность алюминия

Польза железа наблюдается только в жаропрочных сплавах, в остальных же случаях оно уменьшает коррозионную стойкость, пластичность и электропроводность алюминия, но также немного увеличивает его прочность. Железо вредно как для алюминия, так и для его сплавов с магнием и кремнием.

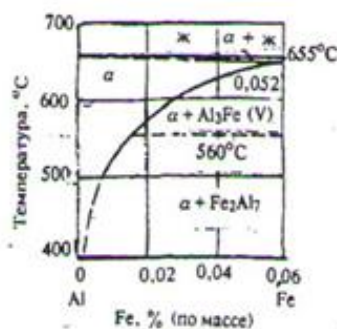


Рисунок 3.2 – Диаграмма состояния системы алюминий – железо

Кремний, наиболее часто встречается в составе алюминиевых сплавов. Значительно упрочняет сплав, при содержании кремния свыше 0,05% делает сплав хрупким, кристаллизуется на границах сплава в виде иголочек, приводящих к срезу образовавшихся очагов схватывания, предшествующих возникновению задира. Улучшает литейные свойства алюминия, снижает температуру плавления. Образует с алюминием эвтектику.

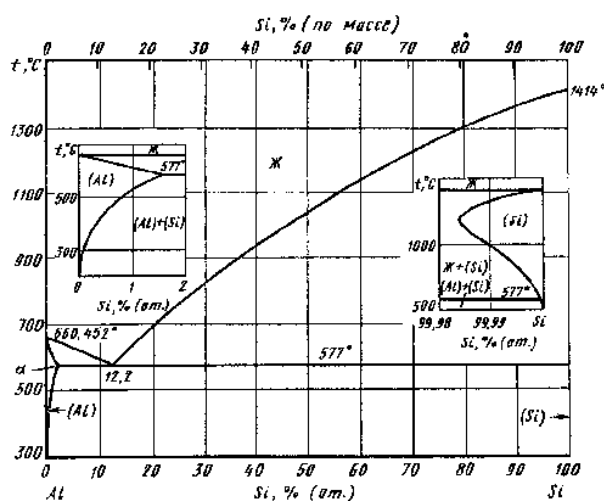


Рисунок 3.3 – Диаграмма состояния системы алюминий – кремний

Бор увеличивает электропроводность и является рафинирующей добавкой. В среднем бор вводится в количестве 0,1 %.

Бериллий уменьшает окисление при повышенных температурах. Небольшие добавки бериллия 0,01–0,05% применяют в алюминиевых литейных сплавах для улучшения текучести.

Медь делает сплав более прочным, максимальное упрочнение достигается при содержании меди в сплаве порядка 4 – 6%.

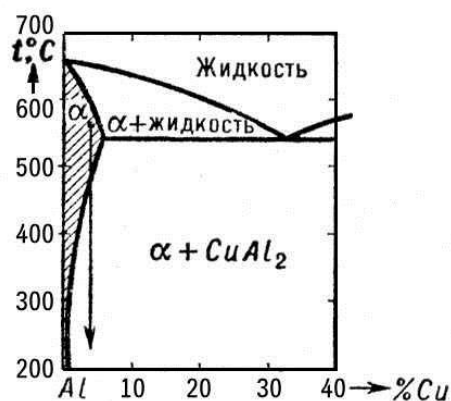


Рисунок 3.4 – Диаграмма состояния системы алюминий – медь

Цинк упрочняет алюминиевую матрицу.

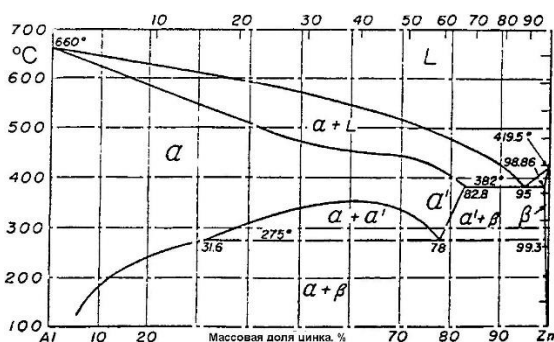


Рисунок 3.5 – Диаграмма состояния системы алюминий – цинк

Кальций придаёт пластичность. При содержании кальция ~5% сплав становится сверхпластичным.

Введение марганца в сплавы типа «магналий» повышает их жаропрочность и улучшает коррозионную стойкость, железо в таком сплаве снизит коррозионную стойкость.

Олово, висмут, кадмий, свинец, из-за образования легкоплавких фаз, делают сплав более подверженным к разрезу.

Титан измельчает зерно, за счет введения в расплав мелкодисперсных фаз, служащих центрами кристаллизации, что в свою очередь значительно

повышает прочностные характеристики сплава и способствует выдавливанию газовых пор, а также равномерно распределяет структуру во всём объёме в момент кристаллизации.

Циркония в объеме 0,3–0,4 % повышает стойкость к разупрочнению после отжига, а также позволяет повысить предел текучести после отжига.

Добавка 0,05–0,2% индия упрочняют сплавы алюминия при старении, особенно при низком содержании меди, такие сплавы используются при изготовлении шарико–роликовых подшипников.

Магний увеличивает прочность без потери пластичности, улучшает свариваемость и уменьшает воздействие коррозии.

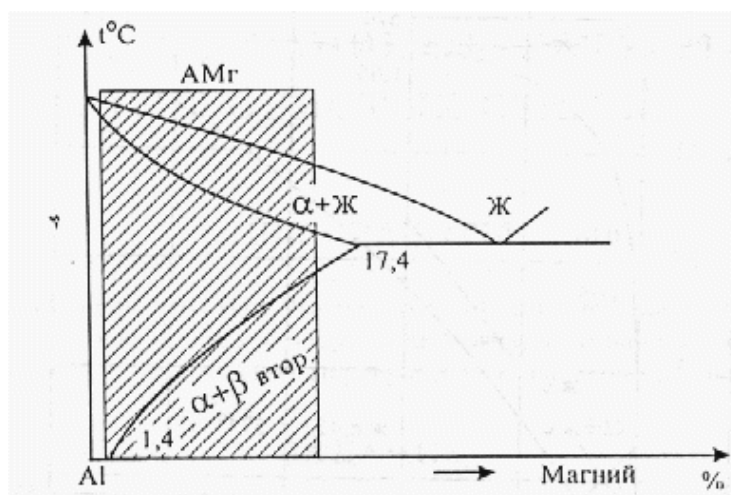


Рисунок 3.6 – Диаграмма состояния системы алюминий – магний

Церий и натрий значительно меняют структуру и свойства алюминиевых сплавов.

Водород хорошо растворяется в алюминии и оказывает отрицательное влияние на его свойства, вызывая при литье пористость, для устранения водорода необходимо применять установки рафинирования и работать с использованием защитных сред, с использованием аргона.

Азот при высоких температурах вступает в реакцию с алюминием, образует тугоплавкие соединения.

Из перечисленных лигатур экспериментально на опытно-промышленной литейной машине, во время литья в электромагнитном кристаллизаторе сплава 01417м, были выделены следующие компоненты Ti и Zr. Наилучший результат при внедрении лигатуры титана достигается совместно с внедрением бора, в следствии, сплав становится прочным и пластичным.

3.2 Применение лигатуры алюминий-титан-бор

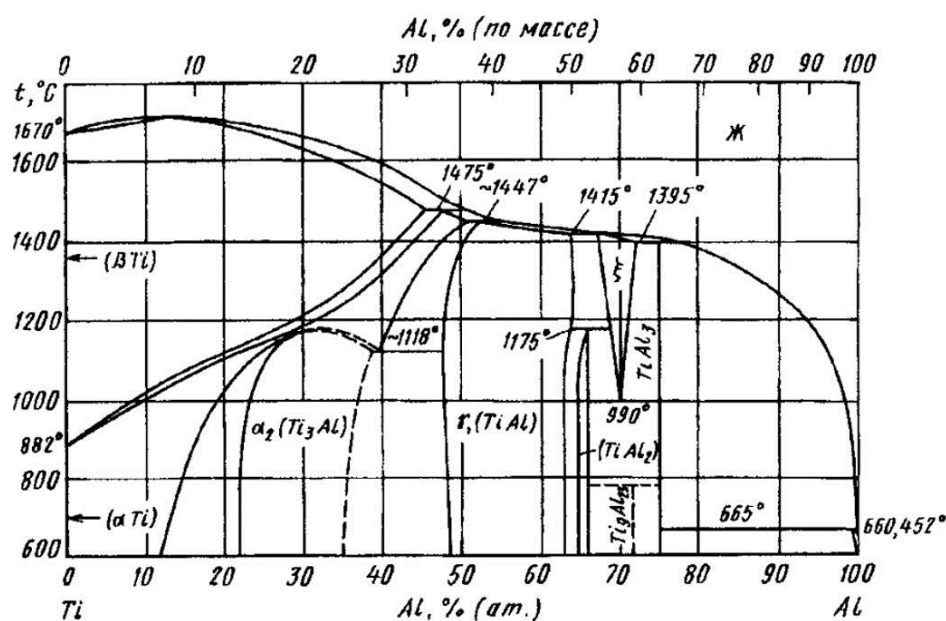


Рисунок 3.7 – Диаграмма состояния системы алюминий – титан

В настоящее время уже есть способ изготовления модификаторов для алюминия и его сплавов, содержащих лигатуру титана для последующего волочения и проката. [65]

Металлографическая структура: титан в лигатуре содержится в виде интерметаллидов TiAl_3 . В лигатуре AlTi в чушке AlTi_3 находится в виде структурных тонких палочек, равномерно распределенных в алюминии, а в проволоке в виде блоков. Минимальная удельная плотность лигатуры 2.5 г/см^3 .

Лигатура алюминий–титан–бор, обычно применяемая в качестве модификатора для литья алюминия, а также для материалов, готовящихся к прокату, технические характеристики лигатур алюминий–титан–борприведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Технические характеристики лигатур алюминий–титан–бор

Марка	Массовая доля элементов	Применение
AlTiB5/1	Ti 5%, B 1%	Универсальная лигатура
AlTiB5/0.6	Ti 5%, B 0,6%	При значительной степени риска образования агломератов боридов
AlTiB 5/0.2	Ti 5%, B 0,2%	
AlTiB 3/1	Ti 3%, B 1%	При применении шихты с высокой концентрацией титана
AlTiB 3/0.2	Ti 3%, B 0,2%	

3.2.1 Технология применения

Лигатура алюминий–титан–бор вводится в расплав вручную в виде стержня или в автоматизированном режиме в виде проволоки. Расплав необходимо тщательно размешать для равномерного распределения диборида титана. Дополнительное использование установок создающих защитную атмосферу увеличивает стоимость изготовления продукции, но улучшает физико–механические показатели конечного продукта, в этом случае необходимо принимать решение в пользу одного. Температура расплава при введении лигатуры составляет 700–750 °С. При равномерном распределении лигатуры, уменьшение зерна будет получено уже через несколько минут и этот эффект будет держаться в течении 6–ти часов.

3.3 Применение лигатуры алюминий–цирконий

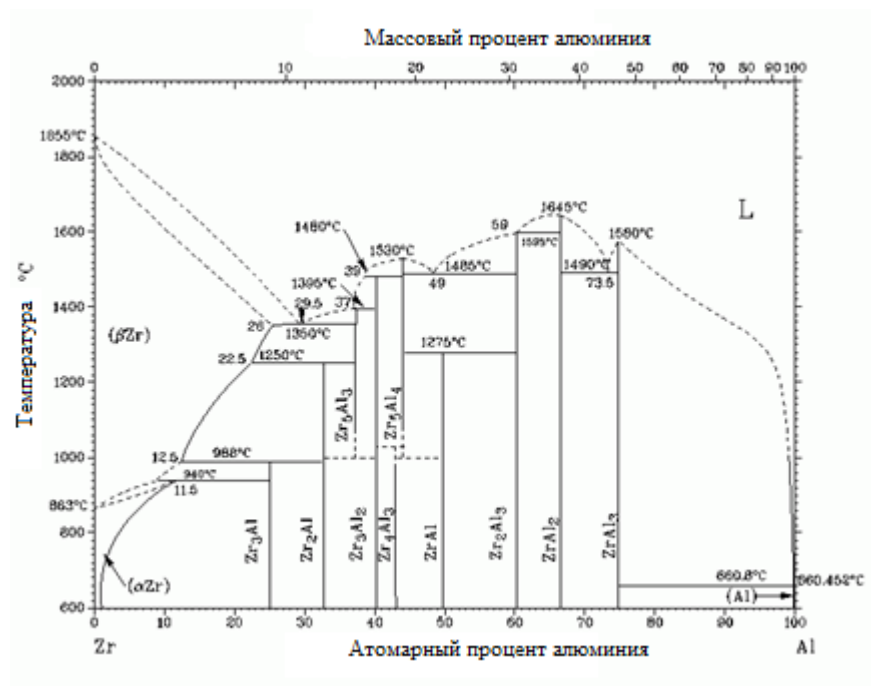


Рисунок 3.8 – Диаграмма состояния системы алюминий – цирконий

Присутствие циркония в алюминии, снижает эффективность роста зерна при повышенных температурах, например, во время сварки, снижает чувствительность к резкому снижению температуры во время закалки, увеличивает коррозионную стойкость под напряжением.

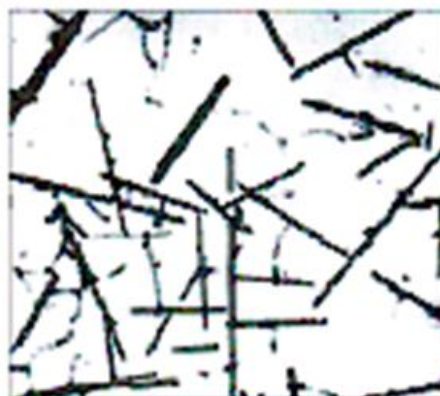


Рисунок 3.9 – Металлографическая структура сплава алюминий–цирконий

Цирконий в лигатуре находится в виде интерметаллидов Al_3Zr и выглядит в форме тонких палочек равномерно распределенная в матрице чистого алюминия. Минимальная удельная плотность лигатуры $2,5 \text{ г/см}^3$.

3.3.1 Технология применения

Сначала необходимо очистить поверхность расплава от окалины, далее лигатура добавляется при температуре $650\text{--}700^\circ\text{C}$ одновременно с размешиванием расплава, для того чтобы равномерно распределить легирующие компоненты по всей массе расплава.

Цирконий подавляет эффективность AlTi_3 и TiB_2 во время уменьшения зерна алюминия, этот процесс зависит от времени нахождения лигатуры в расплаве. В следствии чего, уменьшение же зерна, достигается лишь добавлением AlTiB в виде модифицированного прутка.

4 Проектирование и моделирование будущего прототипа

4.1 Определение параметров работы установки

В качестве базового диаметра валков примем значение 150мм ($D_b=150\text{мм}$). Далее необходимо произвести расчет угла захвата металла валками. Необходимо, чтобы полученный угол захвата не превышал максимально допустимый (для данного типа прокатки 10°). Расчет производится по следующей методике [54].

Все расчетные значения приведены в приложении В.

Площадь поперечного сечения прокатываемой проволоки перед прокаткой:

$$F_0 = \pi \frac{d_0^2}{4}, \quad (4.1)$$

где $d_0 = 12$ – диаметр прокатываемой проволоки, мм.

Диаметр проволоки на выходе:

$$d_1 = d_0 - 1. \quad (4.2)$$

Площадь поперечного сечения прокатываемой проволоки после прокатки:

$$F_1 = \pi \frac{d_1^2}{4}. \quad (4.3)$$

Степень деформации металла при прокатке характеризуется обжатием и вытяжкой. Абсолютное обжатие равно:

$$\Delta d_1 = d_0 - 1. \quad (4.4)$$

Вытяжка – отношение длины полосы после прокатки к ее исходной длине. Так же вытяжка равна отношению площадей поперечных сечений проволоки до прокатки и после:

$$\lambda = \frac{F_0}{F_1}. \quad (4.5)$$

Пространство, ограниченное сверху и снизу дугами захвата валков, боковыми гранями проволоки и плоскостями входа и выхода металла, называется областью или зоной деформации металла.

Косинус угла захвата металла валками определяется по следующему выражению:

$$\cos \alpha = 1 - \frac{\Delta d}{D_B}. \quad (4.6)$$

Угол захвата металла валками определяется по следующему выражению:

$$\alpha = \arccos(\cos \alpha) \cdot \frac{180}{\pi}, \quad (4.7)$$

$$\alpha_{\text{зп}} = \sqrt{\frac{\Delta d}{D_B}} \cdot \frac{180}{\pi}. \quad (4.8)$$

Условие захвата металла валками при прокатке формулируется следующим образом: для того, чтобы валки захватили металл, необходимо,

чтобы коэффициент трения был больше тангенса угла захвата или угол захвата был меньше коэффициента трения: $\alpha < \mu$.

Коэффициент трения пары сталь–алюминий в град:

$$\mu = 0,2 \cdot \frac{180}{\pi}. \quad (4.9)$$

Далее по данной методике были рассчитаны углы захвата для интересующих нас диаметров. Полученные значения углов захвата приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Углы захвата для разных калибров прокатных клетей

Диаметр, мм	12	11	10	9	8,5	8	7	6,5	6	5,5	5	4,5	4
α , град	6,62	6,62	6,62	4,68	4,68	4,68	4,68	4,68	4,68	4,68	4,68	4,68	4,68

Исходя из значений принятых калибров и скорости вращения мотор–редуктора можно определить время прокатки бухты массой 30кг за один проход по следующим формулам:

Частота вращения выходного вала мотор–редуктора:

$$n_{mp} = 8 \frac{1}{мин}. \quad (4.10)$$

Исходя из диаметра валков клетки и скорости вращения мотор–редуктора можно определить линейную скорость подачи заготовки в клеть:

$$V_{ex} = \pi \cdot D_B \cdot n_{mp}. \quad (4.11)$$

Исходя из степени деформации определяется линейная скорость проволоки на выходе их клетки:

$$V_{вых} = \lambda \cdot V_{вх}. \quad (4.12)$$

Средняя плотность алюминиевых сплавов, которые будут обрабатываться в разрабатываемой установке имеет значение $\rho_{спл}=2700 \text{ кг/м}^3$.

Производительность прокатной клетки кг/мин определяется по формуле:

$$Q = \pi \cdot \frac{d_1^2}{4} \cdot V_{вх} \cdot \rho_{спл}. \quad (4.13)$$

Время обработки бухты средней массой 30кг составит:

$$T_{np} = \frac{30\text{кг}}{Q}. \quad (4.14)$$

Таблица 4.2 – Время прокатки бухты массой 30кг через калибр

Время переделки бухты m=30кг (Dв=150мм), мин					
Переход		n выходного вала, об/мин			
		8	16	24	32
12,0	11,0	31	16	10	8
11,0	10,0	37	19	12	9
10,0	9,0	46	23	15	12
9,0	8,5	52	26	17	13
8,5	8,0	58	29	19	15
8,0	7,5	66	33	22	17
7,5	7,0	77	39	26	19
7,0	6,5	89	45	30	22
6,5	6,0	104	52	35	26
6,0	5,5	124	62	41	31
5,5	5,0	150	75	50	38
5,0	4,5	185	93	62	46
4,5	4,0	235	118	78	59
СУММА, час		20	10	7	5

По данным формулам были рассчитаны время переработки проволоки для интересующих калибров. Полученные значения времени прокатки сведены в общую таблицу. Как видно из полученных значений, при переходе на массовое производство рекомендуется использовать мотор–редуктор с более высокой скоростью вращения выходного вала.

Эскиз прокатной клетки представлен на рисунке 4.1. Для изготовления валков применять поковки из стали следующих марок 50, 55, 55Х, 9Х, 9ХФ, 9Х2МФ.

На основании полученных результатов и анализа литературы по прокатному производству первоначально рассматривались три схемы компоновки прокатного модуля:

- 1 Вариант. Двухвалковая система;
- 2 Вариант. Трех валковая система;
- 3 Вариант. Четырех валковая система.

Преимуществом двухвалковой системы является возможность нарезки на одном блоке всего перечня калибров [52]. К недостаткам данной системы можно отнести неравномерность обжатия клетью прокатываемой проволоки, сложность изготовления и настройки клетки. Для исключения образования заусенцев при прокатке необходимо использовать специальные маршруты и схемы прокатки (овал–круг, квадрат–ромб и т.д), что требует использования проводок для исключения сваливания проволоки в калибре при прокатке. Также, исходя из высоких степеней деформации, при переходе с одной формы сечения проволоки на другую, а также выбранного процесса холодной деформации существует риск растрескивания слитка, поэтому рекомендуется не использовать двухвалковую схему прокатки.

Трех и четырех валковая позволяют осуществить равномерное обжатие проволоки при деформации, что делает их использование более предпочтительным [53]. К недостаткам многовалковых клеток можно отнести необходимость изготовления для каждого калибра своей клетки, что увеличивает число элементов оборудования. Выбор между трех или четырех

валковой системой с точки зрения осуществления технологического процесса не имеет большого разницы. С другой стороны, исходя из опытного характера данной установки рекомендуется изготовить прокатную клеть, состоящую из четырех валков. Это обоснованно большей простотой изготовления блока, меньшей нагрузкой на подшипниковые узлы, а также возможностью реализации эффективных и надежных валковых замков.

Эскиз предлагаемой прокатной клетки представлен на рисунке 4.1. Клеть состоит из четырех валковых блоков с прямоугольными несимметричными замками. Каждый блок состоит из валка, вала, двух подшипниковых блока, П-образного основания, двух конических шестерней и четырех шпилек. Блоки крепятся к общему основанию клетки. К нижнему блоку подсоединяется вал от мотор–редуктора.

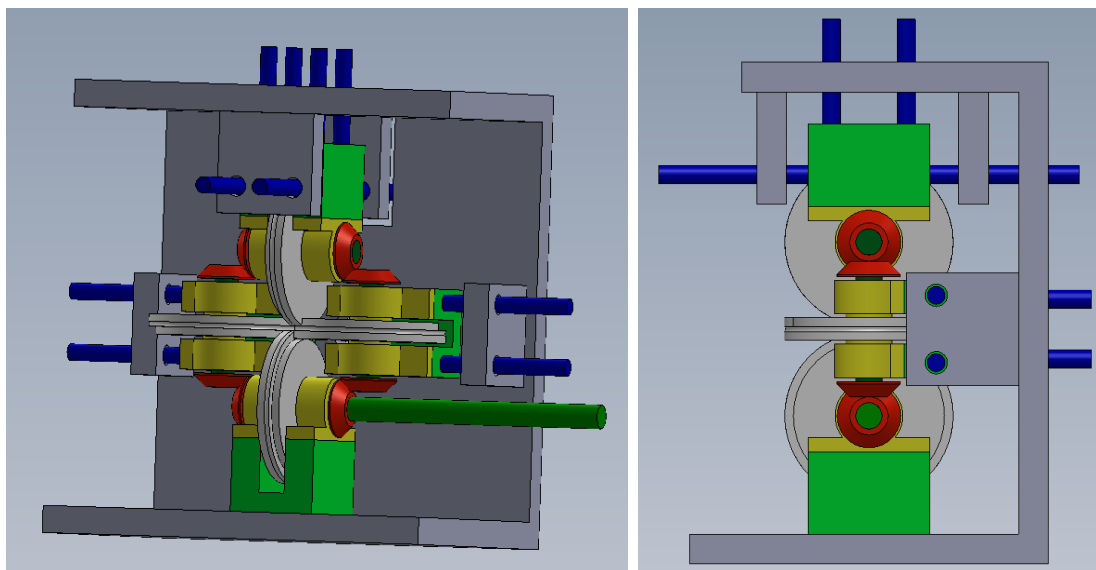


Рисунок 4.1– Эскиз модуля калибровочной клетки

Данная схема прокатного блока позволяет достаточно просто осуществлять настройку клетки. Вначале к станине устанавливается нижний валковый приводной блок. Далее производится установка боковых блоков. Путем регулирования гаек, расположенных на четырех шпильках валкового блока, выставляется общая с нижним валком плоскость поперечная

движению слитка. Далее путем поджима боковыми шпильками валкового блока осуществляется его установка в замок с нижней клетью. Далее аналогичным способом выставляется верхний валковый блок. При этом необходимо, чтобы при установке блоков было выставлено зацепление в конических передачах. В блоки сделаны четыре конических передачи, что позволяет равномерно передавать крутящий момент на все валковые блоки.

4.1.1 Модуль непрерывной экструзии

Повышение конкурентоспособности продукции отечественной металлургической промышленности на мировом рынке возможно главным образом за счет планомерной разработки и реализации инновационных проектов, базирующихся на последних достижениях научно-технического прогресса. Одним из основных направлений инновационного управления металлургическим производством является освоение гибких, компактных, энергосберегающих автоматизированных линий, для изготовления металлоизделий методами непрерывного прессования.

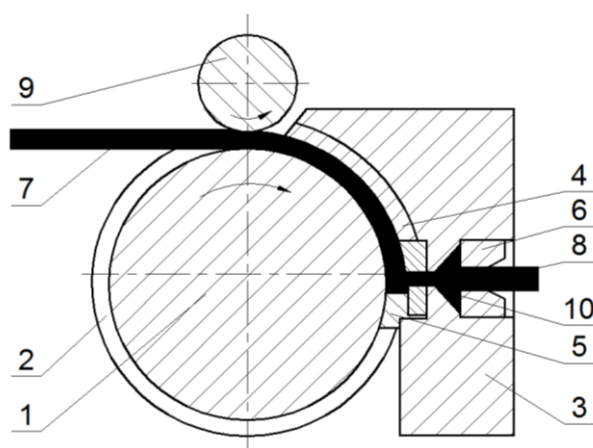


Рисунок 4.2 – Схема Конформ с форкамерой: 1 –рабочее колесо, 2 – ручей колеса, 3 – башмак, 4 – кольцевая вставка, 5 – опорная вставка, 6 – матрица, 7 – прутковая заготовка, 8 – пресс-изделие, 9 – прижимной ролик

Из рассмотренных в работах [55–57] способов непрерывного получения пресс–изделий неограниченной длины наиболее распространенным является непрерывное прессование по методу Конформ, отличающейся простотой осуществления, легкостью управления, малой энергоемкостью, высокой производительностью и выходом годного, возможностью достижения больших степеней деформации.

Способ Конформ, схема которого приведена на рисунке 4.2, основан на применении неподвижного инструмента, называемого башмаком, и подвижного, вращающегося инструмента типа колеса с канавкой (ручьем) по периферии, причем в башмаке установлена матрица и опорная вставка, которая перекрывает ручей колеса.

При подаче в открытый зазор (ручей) между башмаком и колесом прутковой заготовки, имеющий диаметр несколько меньший, чем ширина канавки диска, эта заготовка продвигается в камеру прессования, образуемую поверхностями башмака и канавки, под воздействием сил трения по поверхности контакта с вращающимся колесом и, наконец, достигает матрицы. В зоне непосредственно перед матрицей заготовка подвергается интенсивному пластическому деформированию («раздавливанию») и заполняет все сечение канавки (зона захвата при выдавливании). По мере поворота колеса сжимающее усилие, приложенное к заготовке, увеличивается и достигает величины, необходимой для выдавливания материала заготовки через отверстие в матрице, т.е. начинается процесс прессования. Зона неполного контакта заготовки с поверхностью канавки (зона первичного захвата) служит для развития давления, необходимого для пластического деформирования материала и заполнения объема в зоне перед матрицей. В качестве заготовки можно использовать обычную проволоку, причем процесс ее деформирования – втягивание в камеру прессования по мере поворота колеса предварительное профилирование и заполнение канавки в колесе, создание рабочего усилия и, наконец, прессование – идет непрерывно, т.е. реализуется технология непрерывной экструзии металла [4].

В результате исследований конструктивных и технологических особенностей непрерывного прессования Конформ, проведенных сотрудниками Сибирского федерального университета [55, 56, 59–61] был спроектирован ряд опытно–промышленных установок. Одна из последних моделей установки Конформ представлена на рисунке 4.3, а её прессовый узел на рисунке 4.4.

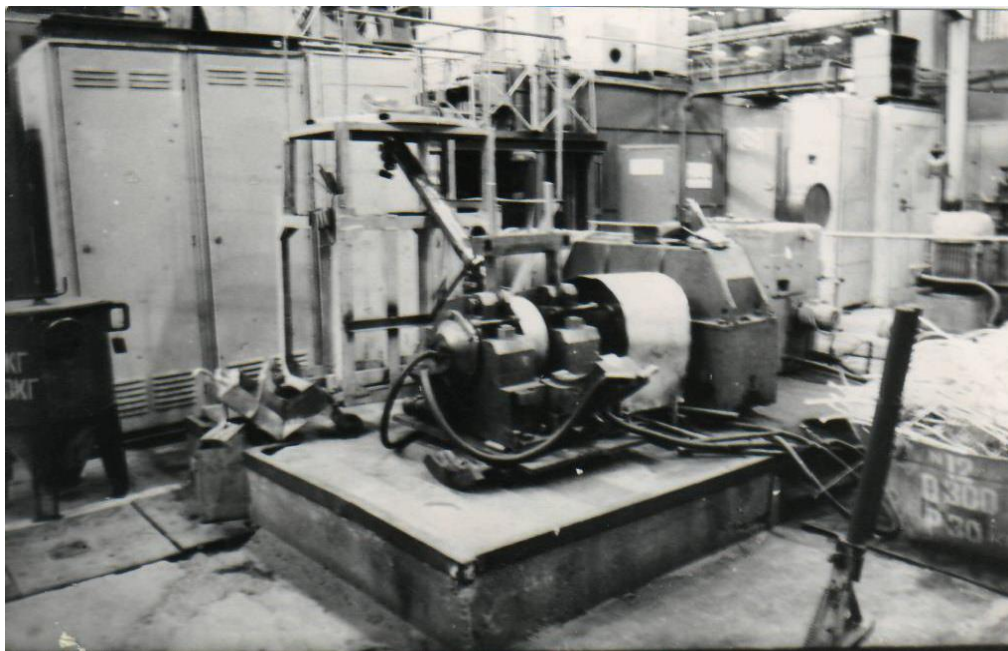


Рисунок 4.3 – Установка Конформ на участке по изготовлению лигатурных прутков из гранулированных алюминиевых сплавов

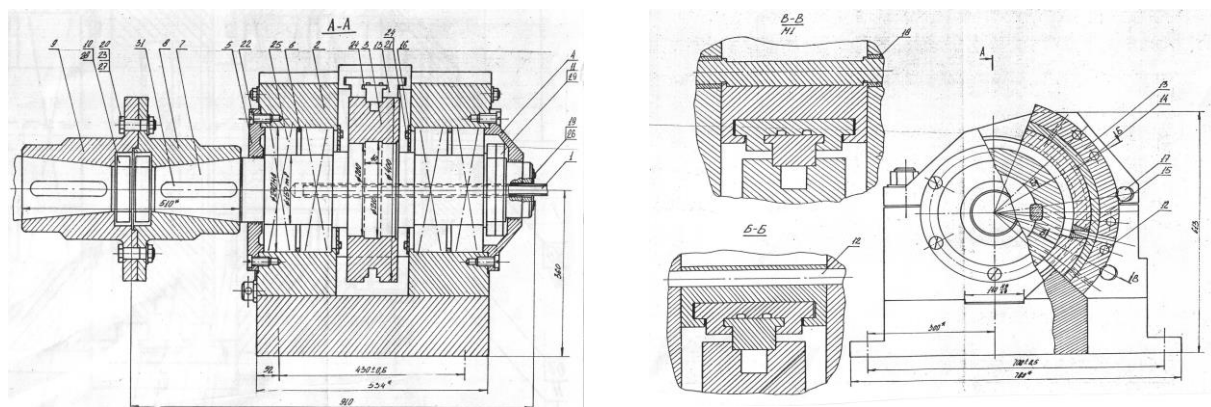


Рисунок 4.4 – Прессовый узел опытно–промышленной установки Конформ

Установка состоит из рабочего блока, включающего приводное колесо с ручьем прямоугольного сечения, неподвижной части контейнера (башмака) с системой крепления и фиксирования в рабочем положении, передаточного звена и электродвигателя постоянного тока. Мощность двигателя, применяемого для привода рабочего блока установки, равная 90 кВт, позволяет проводить процесс непрерывного прессования металла с высокими степенями деформации. Для увеличения крутящего момента на валу рабочего блока привод от электродвигателя осуществлялся через редуктор с передаточным числом 44,01. Ведомый вал редуктора соединительной муфтой связан с валом рабочего узла. На валу шпонкой закреплен бандаж рабочего колеса с ручьем. Для проведения процесса прессования из заготовки диаметром до 15 мм, диаметр бандажа принят равным 300 мм. Вал установлен в двух стойках на подшипниках качения.

На рисунке 4.5 приведен общий вид установки Конформ фирмы Dalian Conform Technical Co., Ltd, конструкция которой не имеет принципиальных отличий от выше описанной [59].

В процессе промышленного применения этих установок были выявлены некоторые недостатки к основному из которых можно отнести отсутствие связи между системой крепления башмака и рабочим валом. Это не позволяет в процессе работы установки соблюдать контролируемый зазор между кольцевой вставкой башмака и дном ручья колеса, что, в свою очередь, нарушает стабильность подачи прутковой заготовки к матрице. В связи с этим авторами предложен прессовочный узел новой конструкции.

Система крепления башмака выполнена с учетом кинематических особенностей процесса прессования. Для этого предусмотрена фиксация башмака в рабочем положении без влияния радиального биения вала на размеры сечения камеры прессования, обеспечения возможности регулирования положения кольцевой вставки и матрицы в ручье колеса, удобства при замене рабочего инструмента и регистрации энергосиловых и температурных параметров процесса экструзии металла. Башмак имеет

форму кольцевого сегмента, внутренний диаметр которого равен диаметру втулок, посаженных на подшипники качения, надетых на вал по обе стороны бандажа. Башмак внутренней поверхностью прилегает к втулкам подшипников и крепится к ним болтами, причем между поверхностями колеса и башмака сохраняется некоторый зазор определенной величины. Таким образом, башмак, связанный с валом посредством крепежных болтов, подушек и подшипников, поворачивается вокруг оси вала независимо от вращения рабочего колеса. Для размещения вставки и матрицы в башмаке предусмотрен кольцевой фигурный паз. Фиксирование помещенной в паз вставки с матрицей в рабочем положении производится прижимными болтами, расположенными в резьбовых отверстиях башмака. Вставка, являясь четвертой стороной калибра, входит в него на некоторую глубину, обеспечивая герметичность камеры прессования в радиальном направлении.



Рисунок 4.5 – Общий вид установки Конформ
фирмыDalianConformTechnicalCo., Ltd[5].

Исходным параметром для расчета модуля КОНФМОРМ является диаметр бандаж. Для данной установки принят следующий размер бандаж $D_{\text{конф}}=268\text{мм}$. Частота вращения бандаж соответствует частоте вращения выходного вала мотор–редуктора и равна 8 об/мин. Исходной деформируемой заготовкой принята заготовка диаметром 11мм.

Площадь поперечного сечения деформируемой заготовки равна:

$$S_{\text{ex}} = \pi \cdot \frac{d_{\text{ex}}^2}{4}. \quad (4.15)$$

Линейная скорость заготовки на входе равна:

$$V_{\text{ex}} = \pi \cdot D_{\text{конф}} \cdot n_{\text{конф}}. \quad (4.16)$$

Производительность модуля КОНФОРМ определяется по следующей формуле:

$$Q = \pi \cdot \frac{d_{\text{ex}}^2}{4} \cdot V_{\text{ex}} \cdot \rho_{\text{спл}}. \quad (4.17)$$

В качестве базового выходного диаметра согласно технического задания принят $D_{\text{вых}}=5$ мм. Площадь поперечного сечения выходной проволоки составит:

$$S_{\text{вых}} = \pi \cdot \frac{d_{\text{ex}}^2}{4}. \quad (4.18)$$

Тогда степень деформации заготовки составит:

$$DEF = \frac{S_{ex}}{S_{bx}} \cdot 100. \quad (4.19)$$

Данная величина не является предельной, так как процесс прессования происходит в горячем состоянии выше температуры рекристаллизации сплава. В процессе испытаний путем замены вставок с калибром возможно будет изменять степень деформации.

Линейная скорость деформируемой проволоки на выходе определяется по формуле:

$$V_{bx} = \frac{Q}{\frac{\pi \cdot d_{ex}^2 \cdot \rho_{спл}}{4}}. \quad (4.20)$$

На рисунках 4.6–4.10 представлены эскизы основных элементов модуля КОНФОРМ на основании которых необходимо разработать проект и изготовить данный модуль.

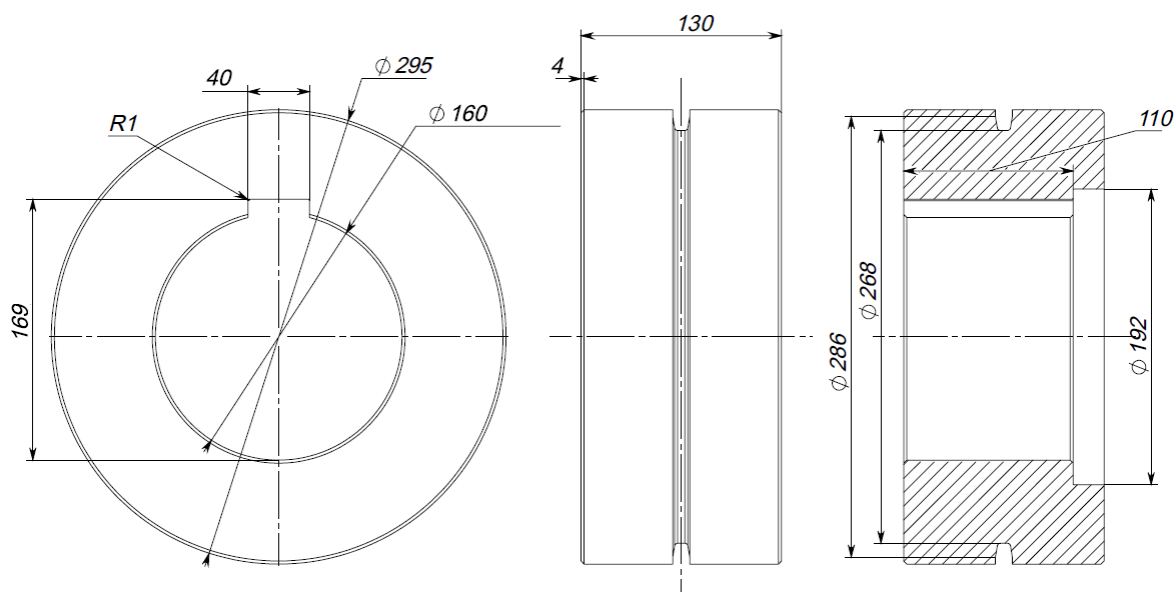


Рисунок 4.6– Эскиз бандажа модуля КОНФОРМ

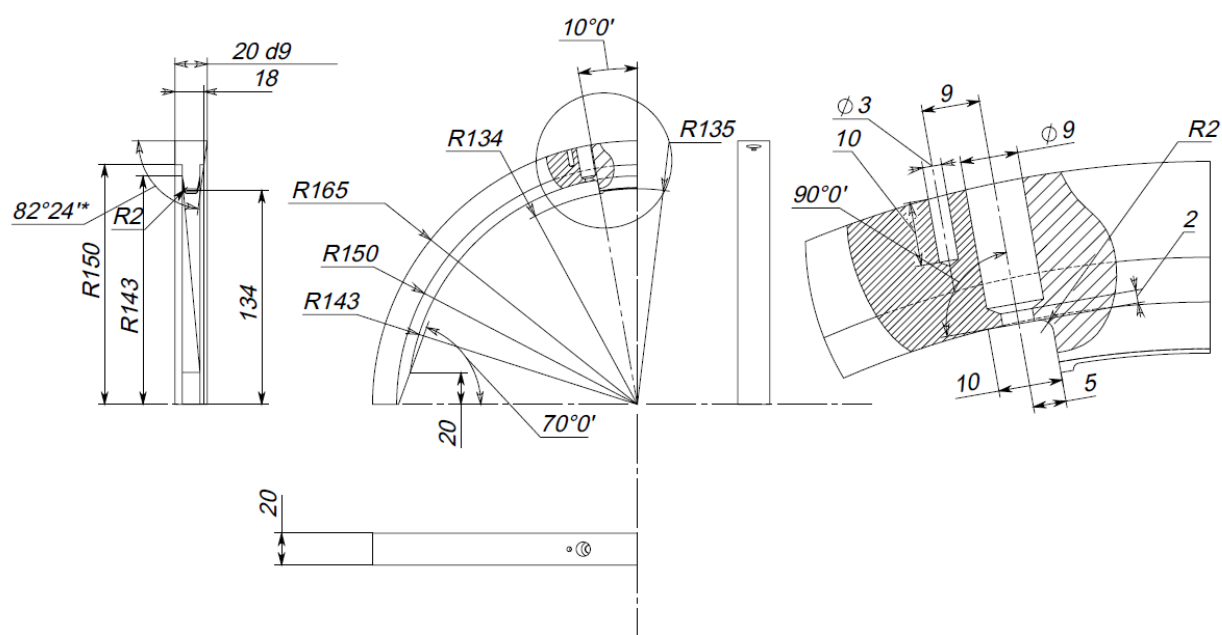


Рисунок 4.7– Эскиз вставки модуля КОНФОРМ

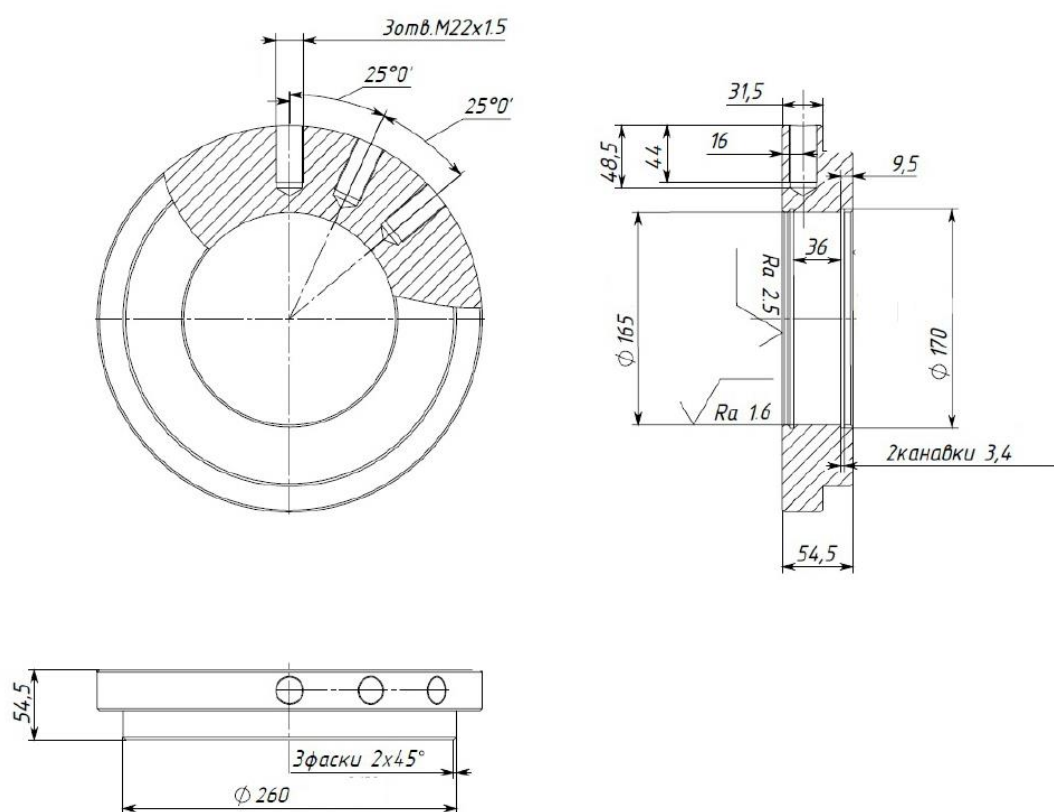


Рисунок 4.8– Эскиз опорного кольца модуля КОНФОРМ

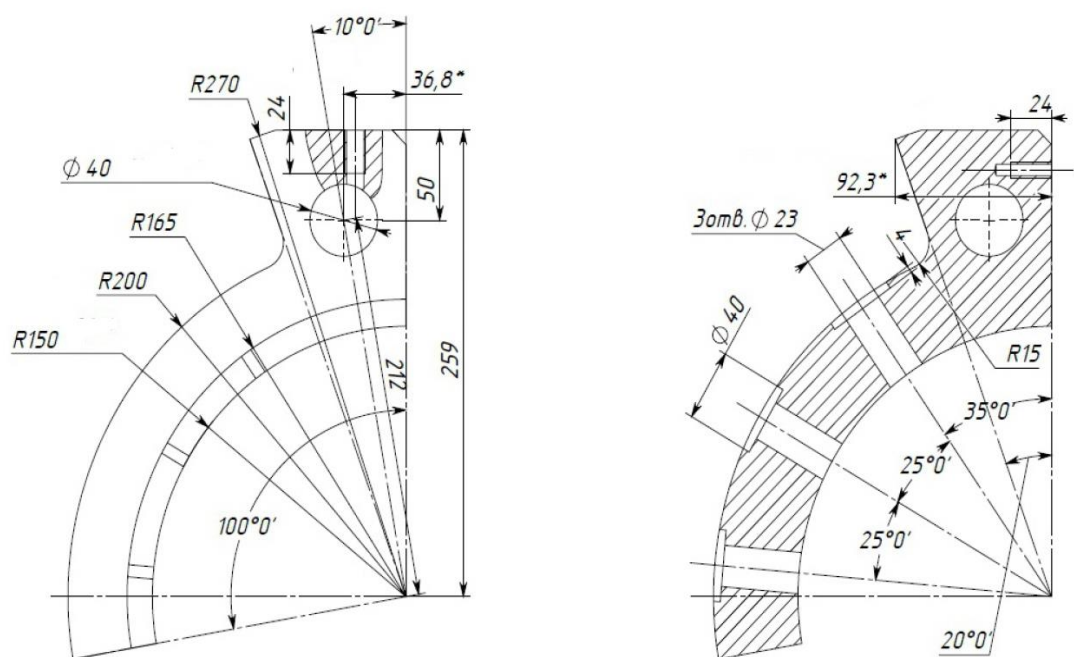


Рисунок 4.9– Эскиз прижима модуля КОНФОРМ

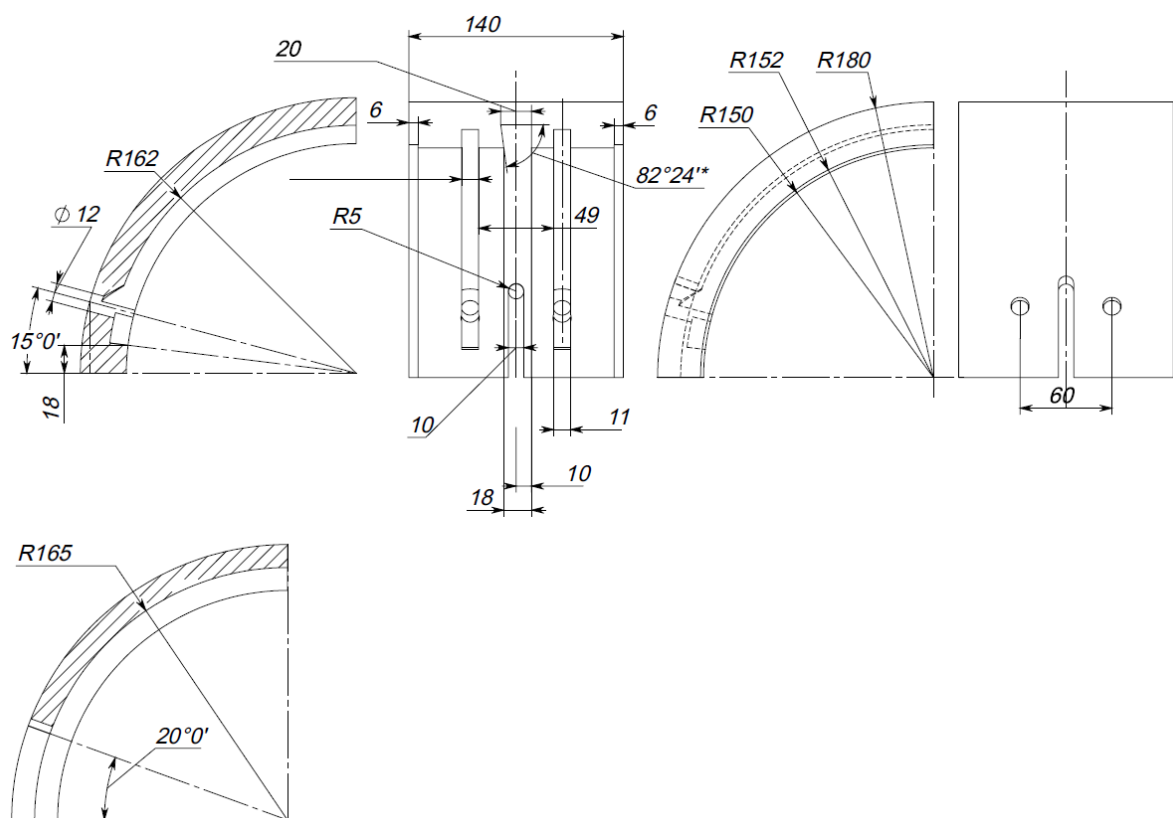


Рисунок 4.10– Эскизсектора модуля КОНФОРМ

Башмак упирается специальной площадкой на упор, который ограничивает проворачивание башмака относительно канавки, обеспечивая протекание процесса прессования. Между упором и площадкой башмака располагается месдоза, предназначенная для измерения силы прессования.

Подготовка к работе и пуск установки производится следующим образом: матрица и вставка соответствующих размеров помещаются в фигурный паз башмака, где их положение фиксируется прижимными болтами. Башмак с установленными в нем матрицей и вставкой крепится к втулкам подшипников болтами. Колесо приводится во вращение запуском электродвигателя. Заготовка определенного профиля подается в калибр, захватывается им и поступает в камеру прессования. Передний конец заготовки достигает матрицы, после чего распрессовывается по поперечному сечению камеры, увеличивая при этом силу контактного трения между стенками ручья колеса и заготовкой до усилия, необходимого для выдавливания изделия в канал матрицы. Процесс подачи заготовки в камеру, ее распрессовка и выдавливание происходят непрерывно по мере вращения колеса.

На опытной установке планируется проведение серии экспериментов с целью усовершенствования технологии и повышения качества проволоки и профилей из новых алюминиевых сплавов в свете развития результатов последних достижений в этой области, опубликованных в работах [62–64].

4.1.2 Намоточное устройство

Для осуществления намотки деформированной проволоки из модуля прокатной клетки или модуля КОНФОРМ необходимо разработать намоточное устройство позволяющее наматывать проволоку в бухту с внутренним диаметром 600–650мм и высотой 100мм. Общий вид бухт приведен на рисунке 4.11. Общие виды аналогов необходимого намотчика представлены на рисунке 4.12.



Рисунок 4.11– Проволока в бухте

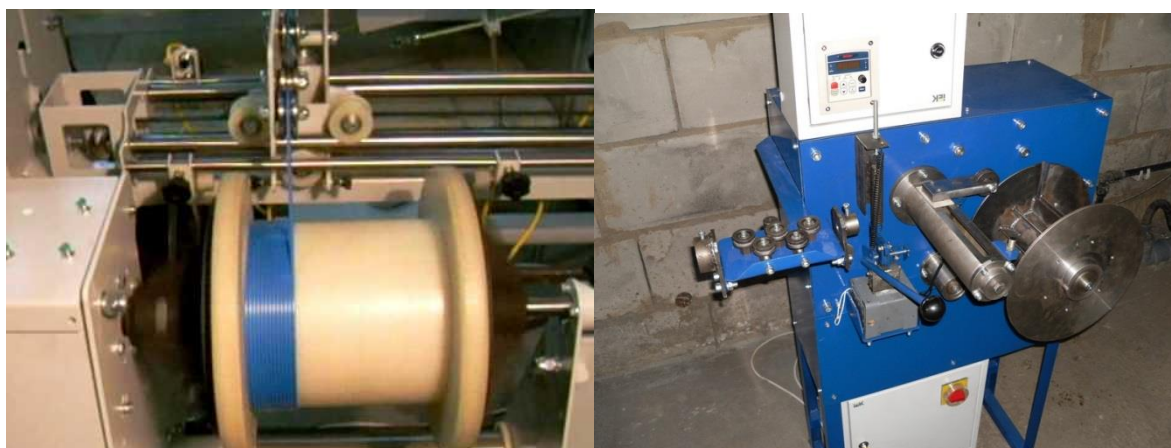


Рисунок 4.12– Намоточные машины

Для осуществления равномерной намотки и плотной укладки проволоки в бухте предлагается в намотчике использовать специальный механический укладчик проволоки (общий вид представлен на рисунке 4.13.)

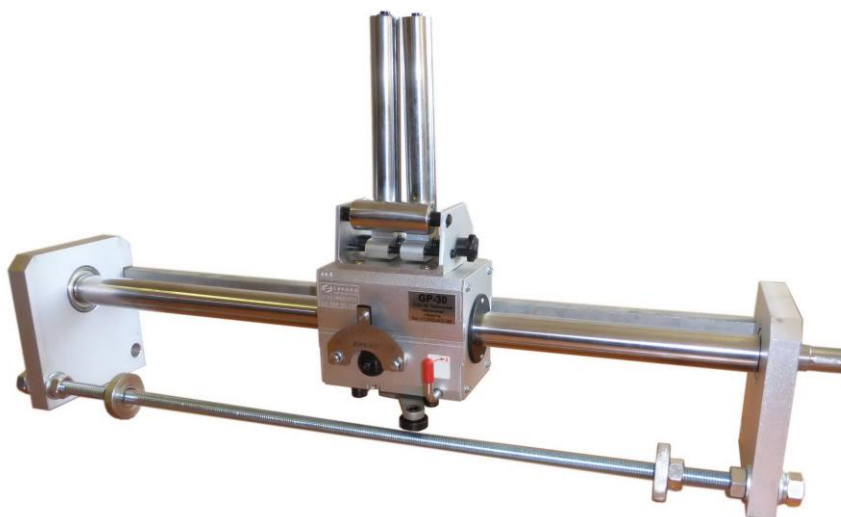


Рисунок 4.13– Раскладчик проволоки

Максимальный предел текучести проволоки наматываемый на барабан составляет: $\sigma_s = 200$ МПа.

Момент сопротивления проволоки диаметром 5мм имеет значение:

$$W_{II} = 0,1 \cdot D_{\text{блх}}^3 \quad (4.21)$$

При сматывании полосы в рулон материал по всей толщине проволоки испытывает напряжения, близкие к пределу текучести, т.е. получает пластический изгиб, момент которого выражается формулой:

$$M_{\text{изг}} = \sigma_s \cdot W_{II} \quad (4.22)$$

Так как момент изгиба проволоки действует в плоскости, перпендикулярной горизонтальной оси барабана моталки, то его можно переносить в пределах этой плоскости и считать, что момент приложен к валу привода барабана. Диаметр намоточного барабана $D_6 = 650$ мм.

Удельное натяжение проволоки для ее равномерной укладки в бухту должно иметь значение не менее:

$$\sigma_n = \sigma_s \cdot 0,1. \quad (4.23)$$

Сматывание происходит с натяжением проволоки, поэтому необходимо учесть еще момент, возникающий от усилия натяжения:

$$M_{нат} = T \cdot R = \sigma_n \cdot S_n \cdot g \cdot \frac{D_{\delta}}{2}. \quad (4.24)$$

Суммарный момент на валу барабана намотчика:

$$M_{нам} = M_{изг} + M_{нат}. \quad (4.25)$$

Сила натяжения проволоки составит:

$$F_{нат} = \frac{M_{нат}}{0,5 \cdot D_{\delta}}. \quad (4.26)$$

Исходя из КПД мотор–редуктора $\eta_{mr} = 0,75$ необходимая мощность электродвигателя составит:

$$P_{дв} = \frac{M_{нам} \cdot 2 \cdot V_{вых}}{D_{\delta}} \cdot \frac{1}{\eta_{mr}}. \quad (4.27)$$

Частота вращения намоточного барабана:

$$\eta_{\delta} = \frac{V_{вых}}{\pi \cdot D_{\delta}} \cdot \frac{1}{\eta_{mr}}. \quad (4.28)$$

Для определения типоразмера раскладчика необходимо произвести следующий расчет необходимого сдвигового усилия раскладчика для диаметров проволоки от 11мм до 5мм.

Для данных диаметров по вышеприведённым формулам были рассчитаны необходимые сила натяжения проволоки: для диаметра 5мм $F_{5\text{мм}} = 40\text{кг}$; для диаметра 11мм $F_{11\text{мм}} = 203,9\text{ кг}$.

На рисунке 4.14 представлена эскизная схема намоточного устройства. Базовыми размерами, влияющими на выбор раскладочного устройства, являются размеры ОС и АО.

Для значений ОС=50мм и АО=800мм предельный тангенс угла отклонения проволоки от оси выхода имеет значение:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{OC}{AO}. \quad (4.29)$$

Предельный угол отклонения равен:

$$\alpha = a \tan(\operatorname{tg} \alpha) \cdot \frac{180}{\pi}. \quad (4.30)$$

Исходя из требуемой силы натяжения и угла отклонения слитка получим проекции сил натяжения на поперечную ось:

$$F_{\text{попер}_5} = F_{5\text{мм}} \cdot \sin\left(\alpha \cdot \frac{180}{\pi}\right). \quad (4.31)$$

$$F_{\text{попер}_{11}} = F_{11\text{мм}} \cdot \sin\left(\alpha \cdot \frac{180}{\pi}\right). \quad (4.32)$$

Данные значения сил являются базовыми при выборе механического раскладчика проволоки.

В результате расчета была построена эскизная схема опытно–промышленной установки для калибровки и экструзии слитка, представленная на рисунке 4.15. В состав установки входит отдающее устройство в горизонтальном исполнении. На устройство первоначально необходимо установить бухту непрерывнолитого слитка. Далее на него устанавливается барабаны с откалиброванной проволокой. Отдающее устройство необходимо оснастить тормозным механизмом для создания натяжения слитка или проволоки перед его подачей рабочий модуль. При этом необходимо на входе и выходе с рабочего модуля необходимо установить роликовые направляющие для исключения закусывания проволоки. Пульт управления установкой рационально расположить с торцевой стороны рабочего модуля. При этом необходимо возле всех элементов опытной установки установить кнопки аварийной остановки. Общие габариты установки должны составить 4х7 метра без учета пространства необходимо для эксплуатации.

Диаметр проволоки, мм	11	5
Момент на намотчике, Н*м	640	130
Линейная скорость намотки, м/мин	7,5	33
Скорость вращения барабана, об/мин	3,7	16
Сила натяжения проволоки, кг	200	40
Сдвигающая сила на раскладчике, кг	13	2,5

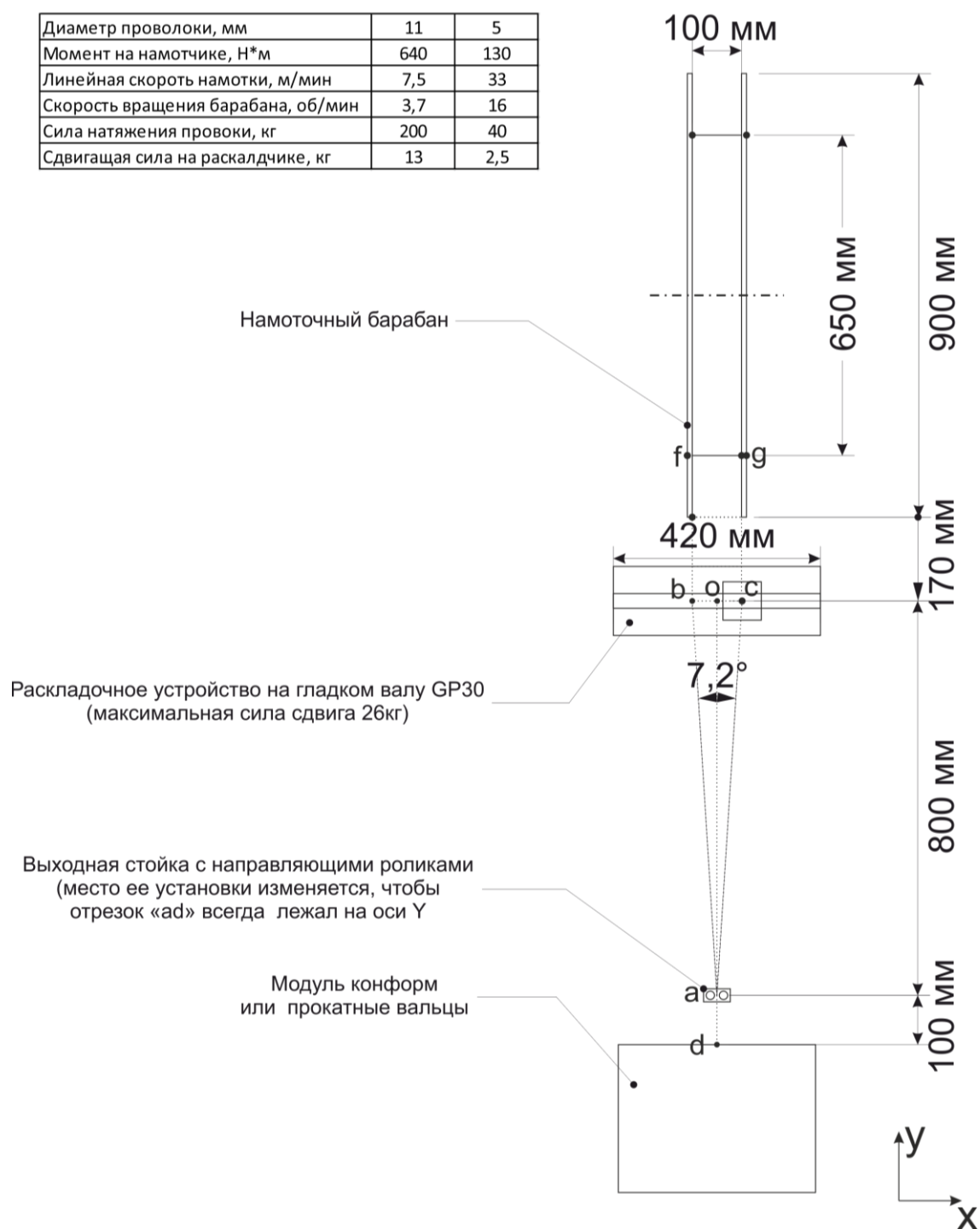


Рисунок 4.14 – Эскизная схема намоточного устройства

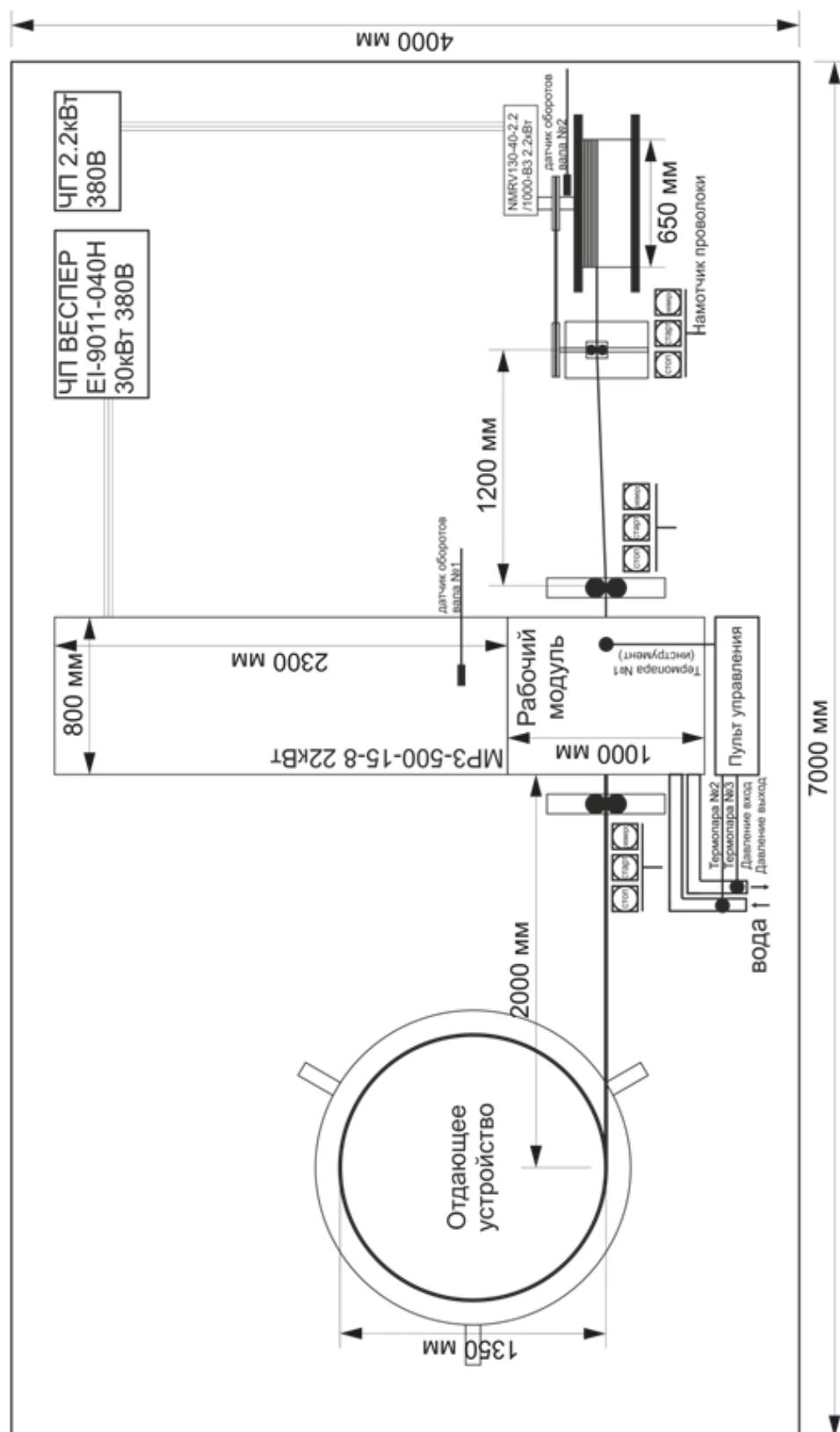


Рисунок 4.15 – Эскизная схема опытно–промышленной установки для калибровки и экструзии слитка

4.2 Моделирование в среде ANSYS

С помощью метода конечных элементов по исходным данным из методики инженерного расчета представленных во второй главе данной магистерской работы, был произведен расчет в программной среде ANSYS. Во избежание краевых эффектов, заготовка в модели была увеличена в 2 раза по сравнению с длиной индуктора в связи с чем изображения выглядят в как 2 бесконечных линии.

Потеря энергии, выделяемая в виде тепла от витков индуктора представлена на рисунке 4.16.

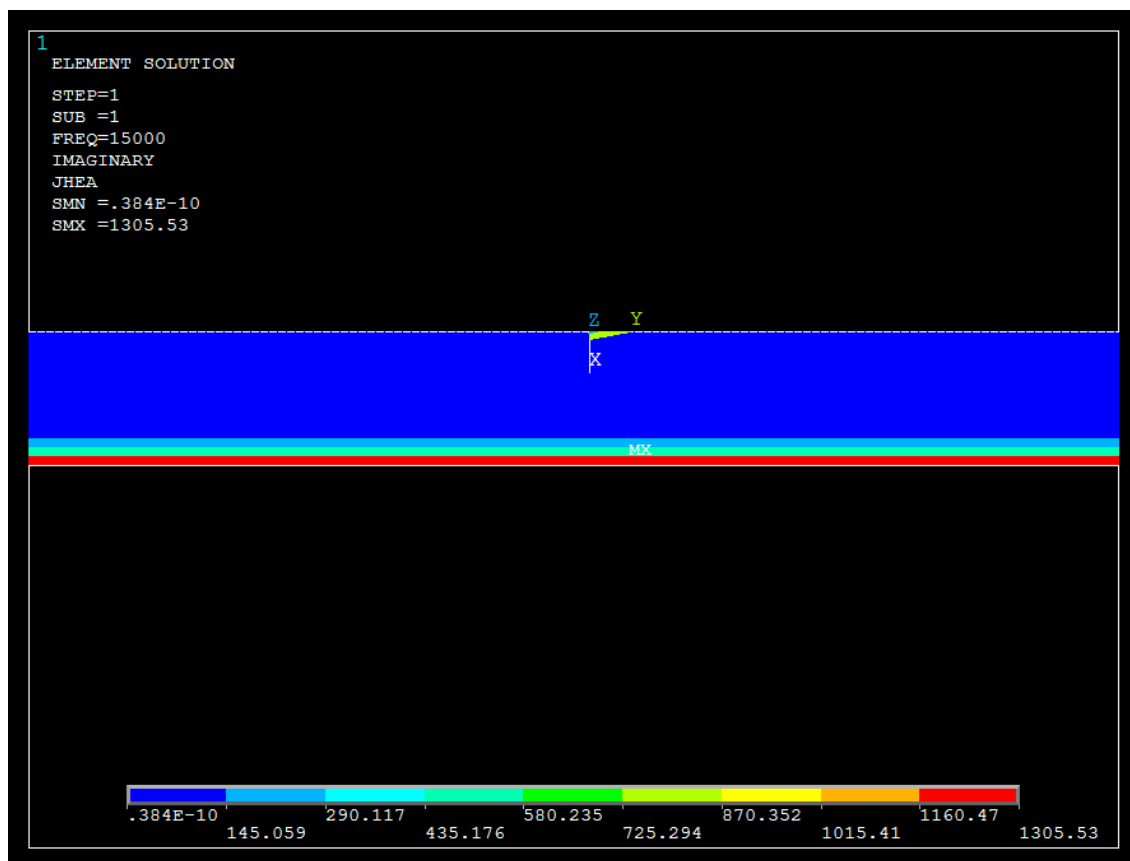


Рисунок 4.16 –Джоулево тепло

Так же с помощью математической модели легко показать плотность протекающего тока в поверхности заготовки рисунок 4.17.

В заготовке виден ярко выраженный поверхностный эффект, по расчетам это 0,687 мм, остальная часть загрузки прогревается за счет теплопроводности, к тому же индуктор вытянут длиной в 900мм это позволит равномерно прогреться всей заготовке.

Для расчетов использовалась учебная лицензия пакета ANSYS.

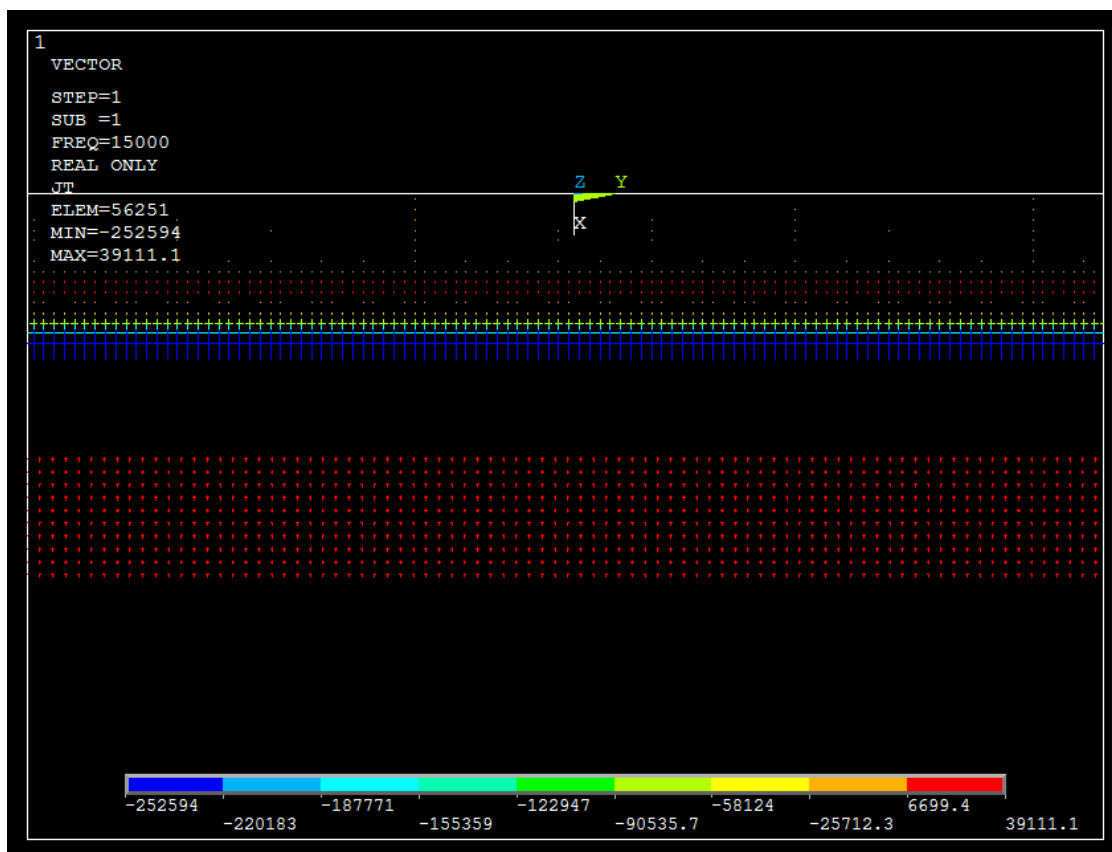


Рисунок 4.17 –Плотность тока в нагреваемом теле

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная технологическая цепочка, модуль экструзии и установка индукционного нагрева, позволяет создать проект опытно–промышленной установки для получения особо тонкой алюминиевой проволоки из сплавов (АМГ6 и 01417). Так же в установке индукционного нагрева, рекомендуется использовать фиксирующие ролики для фиксации слитка в индукторе и трубу из кварцевого стекла, для избежание замыкания слитка об индуктор.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Федоров, М.В. Алюминий и алюминиевые полуфабрикаты на внутреннем рынке / М.В. Федоров // Металлоснабжение и сбыт. – 2002. – Июнь – С. 86–91.209.
- 2 Перлин, И.Л. Теория прессования металлов / И.Л. Перлин, Л.Х. Райтбарг. – М.: Металлургия, 1975. – 448 с.
- 3 Райтбарг, Л.Х. Производство прессованных профилей / Л.Х. Райтбарг. – М.: Металлургия, 1984. – 264 с.
- 4 Бережной, В.Л. Прессование с активным действием сил трения / В.Л. Бережной, В.Н. Щерба, А.И. Батулин. – М.: Металлургия, 1988. – 296 с.
- 5 Бережной, В.Л. Технология активно–обратного прессования: условия применения и требования рынка / В.Л. Бережной // Цветные металлы. – 1998. – № 7. – С. 66–70.
- 6 Бережной, В.Л. Технологически многоцелевое прессование с позитивно–активным трением / В.Л. Бережной // Цветные металлы. – 2001. – № 2. – С. 41–47.
- 7 Щерба, В.Н. Технология прессования металлов / В.Н. Щерба, Л.Х. Райтбарг. – М.: Металлургия, 1995. – 336 с.
- 8 Ерманок, М.З. Прессование профилей из алюминиевых сплавов / М.З. Ерманок, В.И. Фейгин, Н.А. Сухоруков. – М.: Металлургия, 1977. – 264 с.
- 9 Щерба, В.Н. Прессование алюминиевых сплавов / В.Н. Щерба. – М.: Интернет–Инжиниринг, 2001. – 768 с.
- 10 Алюминиевые сплавы. Производство полуфабрикатов из алюминиевых сплавов: справ / Г.А. Балахонцев, Р.Н. Барбанель, Б.И. Бондарев [и др.]. – М.: Металлургия, 1985. – 352 с.
- 11 Головинов, М.Ф. Исследование температурно–скоростных условий процесса прессования алюминиевых сплавов и разработка промышленных методов его интенсификации: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – М.: ВИЛС, 1972. – 30 с.

- 12 Довженко, Н.Н. Прогнозирование и повышение точности размеров и однородности свойств профилей из алюминиевых сплавов через плоские матрицы: авторефер. дисс. ... канд. техн. наук. –Свердловск_РМ • _†_†_: УПИ, 1984. – 30 с.
- 13 Шевакин, Ю.Ф. Повышение эффективности производств труб из цветных металлов / Ю.Ф. Шевакин, А.М. Рытиков. – М.: Ме–таллургия, 1968. – 240 с.
- 14 Горячее гидропрессование металлических материалов /А.И.Колпашников, В.А. Вялов, А.А. Федоров, А.П. Петров. – М.: Металлургия, 1977. – 271 с.
- 15 Мурашко, Р.Е. Современное состояние и тенденции развития гидростатического прессования порошков // Р.Е. Мурашко, А.Н. Курович. Р.Р. Саубанов // Тяжелое машиностроение. – 2007. – № 1. – С. 25–30. 210
- 16 Бережной, В.Л. Предпосылки к использованию холодного прессования на машиностроительных заводах / В.Л. Бережной // Технология легких сплавов. – 2009. – № 3. – С. 102–109.
- 17 Агапитова, О.Ю. Совершенствование процесса гидромеханического выдавливания цветных металлов / Извест. вузов. Цветная металлургия. – 2011. – № 4. – С. 50–55.
- 18 Луговской, В.М. Горячая и холодная обработка материалов жидкостью сверхвысокого давления / В.М. Луговской, Г. Даниели // Металлург. – 2011. – № 3. – С. 65–68.
- 19 Бережной, В.Л. К разработке бесконтейнерного прессования для деформационного передела слитков–столбов / В.Л. Бережной // Технология легких сплавов. – 2011. – № 1. – С. 73–80.
- 20 Уральский, В.Т. Производство фасонных профилей методом гидропрессования / В.Т. Уральский. – М.: Металлургия, 1978. – 168 с.
- 21 Green, D. Conform a new method for the continuous forming of metals. / D. Green // Brit. Ind. – 1969. – 10 – № 6. – P. 18–19.
- 22 Goodes, I.M. Continuous Extrusion by the Conform process. / I.M. Goodes // Wire Ind. – 1975. – 42 – № 501. – P. 677.

- 23Benedyk, J.C. Friction – Assisted Extrusion of Aluminum Alloys /J.C. Benedyk // Light Metal Age. – 1983. – № 5. – P. 17–18.
- 24 Применение процесса непрерывного прессования Конформдля консолидации материалов // PowderMetallurgy. – 1987. – V.30 –№ 2. – P.69–70.
- 25 Gentry, C. Extrusion: Processes, Machinery, Tooling / C. Gentry //Light Metal Age. – 1986 (44). – № 5. – P. 5–6.
- 26 Kennedy, A.J. 1971 May lecture–Wire / A.J. Kennedy // Metalsand Materials. – 1971. – v.5 – № 11. – P. 361–369.
- 27 Gentry, C. Conform nun das vollendetsteStranggussverfahren /C. Gentry // Metallurgie. – 1984 (51). – № 6. – P. 218–231.
- 28Grzyb, R. The experimental investigations on the Force Parametersand metal flow in the combined process of Rolling and Extrusion /R. Grzyb, Z. Misiolek // ArchiwumHutnitwa. – 1983. – № 3. – V. 28. –P. 321–340.
- 29Avitzur, B. Combining Extrusion and Rolling / B. Avitzur // WireJournal. – 1975. – P. 73–80.
- 30Сидельников, С.Б. Комбинированные и совмещенные методыобработки цветных металлов и сплавов : монография / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, Н.Н. Загиров. – М.: МАКС Пресс, 2005. – 344 с.
- 31 Прессование алюминиевых сплавов: моделирование и управление тепловыми условиями: монография / Н. Н. Довженко, С.В. Беляев, С.Б. Сидельников [и др.]. – Красноярск: Сиб. федер. ун–т, 2009. – 256 с.
- 32 William, G. Conform and Linex– Continuous Aluminium ExtrusionMachines / William G., Voorkes J. //Light Metal Age. – 1978 (36). –№ 1–2. – P. 18–20.
- 33 Black, I. Conform and Linex. Now approaches to the continuousextrusion of aluminium / I. Black, D. Bremiser// Wire Ind. – 1976 (9) –№ 4. – P. 64–69.
- 34 Maddock, B. Development in Conform Extrusion / B. Maddock //Non–Ferrous Metals Ind. Proc. – 5th, BNF , Int. Conf., London. – 1977. –P. 1–15.
- 35Etherington, C. The UKAEA Conform of Continuous ExtrusionForming / C.Etherington // Wire Ind. – 1977 (44). – № 51. – P. 161–163.

- 36 Slater, H. Development experience with the conform continuous extrusion process on cohere / H. Slater, D. Keith // Wire Ind. – 1979 (78). – № 2. – P. 76–82.
- 37 Cartwright, I. Die machine extrudes wire in single pass without flash in huge volume / I. Cartwright // Wire Journal – 1977. – № 11. – P. 53–56.
- 38 Козырев, А.С. Современные процессы изготовления проволоки / А.С. Козырев // Электротехническая промышленность. Сер.: Кабельная техника. – 1980. – Вып. 6. – С. 28–33.
- 39 Современные способы непрерывного прессования труб, профилей и проволоки / М.З. Локшин, В.Н. Шамраев, В.В. Авдеев [и др.] // Технология легких сплавов. – 1992. – № 10. – С. 60–65.
- 40 Гильденгорн, М.С. Непрерывное прессование труб, профилей и проволоки способом Конформ / М.С. Гильденгорн, В.В. Селиванов // Технология легких сплавов. – 1987. – № 4. – С. 67–83.
- 41 Metallurgie: Conform nun das vollendetste Stranggussverfahren // Metallurgie. – 1984 (51). – № 6. – P. 218–231.
- 42 Скотт, К. Экструзионная установка Conform™, алюминиевые отходы и космические технологии / К. Скотт // Цветные металлы. – 2001. – Июнь. Специальный выпуск. – С. 91–93.
- 43 Kennedy, J.A. The Extrusion Press Line for 2024 / J.A. Kennedy // Proc. of 8th Intern. Alum. Extr. Techn. Seminar. – May 18–21, Orlando, USA. – P. 345–351.
- 44 Laue, K. Extrusion: Processes, Machinery, Tooling / K. Laue, H. Stenger // ASM, Metal Park, OH, USA. – 1981. – 457 p.
- 45 Проспект фирмы Babcock Wire Equipment Ltd (Великобритания), 1987. – 27 с. 212
- 46 Проспект фирмы Holton Machinery Ltd. (Великобритания), 1986. – 29 с.
- 47 Bryant, A. Isothermal Extrusion / A. Bryant, W. Dixon // Light Metal Age. – 1999. – № 3–4. – P. 8–36.
- 48 Современные способы непрерывного прессования труб, профилей и проволоки / М.З. Локшин, В.Н. Шамраев, В.В. Авдеев [и др.] // Технология легких сплавов. – 1992. – № 10. – С. 60–65.

- 49 Green, D. The continuous extrusion forming of wire sections /D. Green // TRG Report. – 1972. – July.
- 50 Патент 3934446, США, В21 В 21/01 Method of and apparatus for production of wire.
- 51 Разработка устройств для непрерывного прессования цветных металлов и сплавов способом Конформ на основе морфологического анализа / В.Н. Корнилов, Ю.В. Горохов, В.М. Сергеев [и др.] // Цветные металлы. – 1995. – № 11. – С. 58–62.
- 52 Анурьев В.И. Справочник конструктора–машиностроителя. Том 1 В 3–х т. Т. 1 – 9–е изд., перераб. и доп. / Под ред. И.Н. Жестковой. – М. : Машиностроение, 2006. – 928 с.
- 53 Анурьев В.И. Справочник конструктора–машиностроителя Том 2 В 3–х т. Т.2 – 9–е изд., перераб. и доп. / Под ред. И.Н. Жестковой. – М. : Машиностроение, 2006. 960 с.
- 54 Анурьев В.И. Справочник конструктора–машиностроителя. Том 3 В 3–х т. Т.3 – 8–е изд. перераб. и доп. / Под ред. И.Н. Жестковой. – М. : Машиностроение, 2001. – 864 с.
- 55 Инновационные совмещенные технологии при обработке металлов. Сидельников С.Б., Горохов Ю.В., Беляев С.В. // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2015. – Т. 8. – № 2. – С. 185–191.
- 56 Горохов Ю.В., Шеркунов В.Г., Довженко Н.Н., Беляев С.В., Довженко И.Н. Основы проектирования процессов непрерывного прессования металлов. Красноярск: СФУ, 2013.
- 57 Баузер М., Зауер Г., Зигерт К. Прессование: Справ. рук–во / Пер. с нем. под ред. В.Л. Бережного. М.: АЛЮМСИЛМВиТ, 2009.
- 58 Goodes, I.M. Continuous Extrusion by the Conform process. / I.M. Goodes // WireInd. – 1975. – 42 – № 501. – P. 677.

- 59 Экструдирование медных шин на установке Конформ с форкамерой/ И.В. Мочалин, Ю. В. Горохов, С. В. Беляев, И. Ю. Губанов // Цветные металлы – 2016 – №5– С. 75–78.
- 60 Использование способа Конформ для переработки стружки из алюминиевых сплавов. Шеркунов В.Г., Горохов Ю.В., Константинов И.Л. и др. // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2015. № 3. С. 60–63.
- 61 Расчет температурных полей деформационной зоны при непрерывном прессовании металлов методом Конформ. Ю.В. Горохов, В.В. Осипов, И.В. Солопко, В.П. Катрюк // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2012. №1, С. 31–34
- 62 Raab G.I., Raab A.G., Shibakov V.G. Analysis of shear deformation scheme efficiency in plastic structure formation processes // Metalurgiya. 2015. Vol. 54. No. 2. P. 423–425.
- 63 Semenova I.P., Polyakov A.V., Raab G.I., Lowe T.C., Valiev R.Z. Enhanced fatigue properties of ultrafine-grained ti rods processed by ECAP–Conform // J. Mater. Sci. 2012. Vol. 47. No. 22. P. 7777–7781.
- 64 Zhou T.G., Jiang Z.Y., Wen J.L., Li H., Tieu A.K. Semi–solid continuous casting–extrusion of AA6201 feed rods // Mater. Sci. Eng. 2012. Vol. 8. P. 108–114.
- 65 Патент, РФ № 2257419, способ получения модифицирующих материалов для алюминия и его сплавов.
- 66 «Актуальные проблемы науки XXI века», Т.А. Боякова, А.В. Игнатов. Красноярск, ФГАОУ ВПО «СФУ ПИ» С. 57.
- 67 Н.И. Фомин Л.М. Затуловский «Электрические печи и установки индукционного нагрева», Москва «металлургия» 1979.
- 68 Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е. «Индукторы для индукционного нагрева». Л., Энергия, 1974
- 69 М.В. Первухин, В.Н. Тимофеев «Современные электротехнологии для производства высококачественных алюминиевых сплавов» Монография.

Красноярск 2015г. Сибирский федеральный университет, Политехнический институт.

70 <http://www.freal.ru>

71 А.П. Альтгаузен «Электротермическое оборудование» справочник. Москва энергия 1980.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Наименование	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Диаметр индуктора	d_1	0,016	м
Длина индуктора	h_1	0,9	м
Площадь загрузки	$S_{\text{заг}}$	133,097	мм ²
Воздушный зазор	b_3	0,2	м
Глубина проникновения	Δ_1	$5,51 \cdot 10^{-4}$	м
Глубина проникновения	Δ_2	$6,872 \cdot 10^{-4}$	м
Активное сопротивление индуктора	r_1	$6,291 \cdot 10^{-6}$	Ом
Относительный радиус загрузки	R_2^-	12,347	м
Активное сопротивление загрузки	r_2	$5,057 \cdot 10^{-6}$	Ом
Реактивное сопротивление загрузки	x_2	$5,057 \cdot 10^{-6}$	Ом
Реактивное сопротивление воздушного зазора	x_3	$3,473 \cdot 10^{-5}$	Ом/виток ²
Круговая частота	ω	$9,425 \cdot 10^4$	Гц
Магнитная проницаемость	μ_0	$1,257 \cdot 10^{-6}$	Г/м
Площадь поперечного сечения зазора	S_3	$8,796 \cdot 10^{-5}$	м ²
Площадь поперечного сечения пустого индуктора	S_1	$2,011 \cdot 10^{-4}$	м ²
Реактивное сопротивление обратного замыкания	X_0	$5,292 \cdot 10^{-4}$	Ом/виток ²
Коэффициент приведения	$C_{\text{пр}}$	0,865	
Приведенное активное сопротивление загрузки	r_2^-	$4,374 \cdot 10^{-6}$	Ом/виток ²
Приведенное реактивное сопротивление индуктора	x_2^-	$3,704 \cdot 10^{-5}$	Ом/виток ²
Эквивалентное активное сопротивление индуктора с нагрузкой	r	$1,067 \cdot 10^{-5}$	Ом/виток ²
Эквивалентное реактивное сопротивление индуктора с нагрузкой	x	$4,333 \cdot 10^{-5}$	Ом/виток ²
Эквивалентное полное сопротивление индуктора с нагрузкой	z	$4,463 \cdot 10^{-5}$	Ом/виток ²
Электрический КПД индуктора	$\eta_{\text{и}}$	0,41	
Коэффициент мощности индуктора	$\cos \varphi_{\text{и}}$	0,239	
Мощность, приведенная к индуктору	P_i	$1,097 \cdot 10^4$	
Число витков индуктора	ω	180	
Активное сопротивления индуктора с нагрузкой	$r_{\text{и}}$	0,352	Ом
Реактивное сопротивления индуктора с нагрузкой	$x_{\text{и}}$	1,43	Ом
Полное сопротивления индуктора с нагрузкой	$z_{\text{и}}$	1,473	Ом
Ток индуктора	I	176,563	А
Настил тока в индукторе	$H_{\text{и}}$	$1,069 \cdot 10^5$	А/м

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Наименование	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Площадь поперечного сечения проволоки перед волочением	F_0	113,097	мм ²
Диаметр проволоки на выходе	d_1	11	мм
Площадь поперечного сечения прокатываемой проволоки после прокатки	F_1	95,033	мм ²
Абсолютное обжатие	Δd	1	мм
Вытяжка	λ	1,19	
Косинус угла захвата металла	$\cos \alpha$	0,993	
Угол захвата металла валками	α	6,62	
	$\alpha_{\text{упр}}$	6,616	
Коэффициент трения	μ	11,459	
Частота вращения выходного вала мотор–редуктора	$n_{\text{мр}}$	8	1/мин
Линейная скорость подачи заготовки в клеть	$V_{\text{вх}}$	3,77	м/мин
Линейная скорость проволоки на выходе из клетки	$V_{\text{вых}}$	4,105	м/мин
Производительность прокатной клетки	Q	1,057	кг/мин
Время обработки бухты средней массой 30кг	$T_{\text{пр}}$	28,375	мин
Площадь поперечного сечения деформируемой заготовки	$S_{\text{вх}}$	95,033	мм ²
Линейная скорость заготовки на входе	$V_{\text{вх}}$	6,736	м/мм
Производительность модуля КОНФОРМ	Q	1,728	кг/мин
Площадь поперечного сечения выходной проволоки	$S_{\text{вых}}$	19,635	мм ²
Степень деформации заготовки	DEF	484	
Линейная скорость деформируемой проволоки на выходе	$V_{\text{вых}}$	32,6	м/мин
Момент сопротивления проволоки диаметром 5мм	$W_{\text{П}}$	$1,25 \cdot 10^8$	м ³
Момент пластического изгиба	$M_{\text{изг}}$	2,5	Нм
Удельное натяжение проволоки	$\sigma_{\text{н}}$	20	МПа
Момент натяжения	$M_{\text{нат}}$	127,627	Нм
Суммарный момент на валу барабана намотчика	$M_{\text{нам}}$	130,127	Нм
Сила натяжения проволоки	$F_{\text{нат}}$	400,391	Н
Необходимая мощность электродвигателя	$P_{\text{ДВ}}$	290,063	Вт
Частота вращения намоточного барабана	η_6	15,965	1/мин
Предельный тангенс угла отклонения проволоки от оси выхода	$tg \alpha$	0,063	

Окончание приложения В

Предельный угол отклонения равен	α	3,576	
Проекции сил натяжения на поперечную ось	$F_{\text{попер}_5}$	2,54	кГ
	$F_{\text{попер}_{11}}$	12,719	кГ